

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA FABRICAÇÃO ADITIVA DE SISTEMA DE SUPORTE DO AUV MEDUSA DEEP SEA

PEDRO RAFAEL SILVA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR FEUP

ENGENHEIRO VÍTOR MARTINS AUGUSTO

ORIENTADOR NORCAM

ENGENHEIRO BRUNO COUTO

Porto, junho de 2018

CANDIDATO Pedro Rafael Silva Costa *Código* 201304740

<i>TÍTULO</i>	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA FABRICAÇÃO ADITIVA DE SISTEMA DE SUPORTE DO AUV MEDUSA DEEP SEA		
<i>DATA</i>	11 de julho de 2018		
<i>LOCAL</i>	F103 DEMM - FEUP		
<i>HORA</i>	10h00		
<i>JURÍ</i>	<i>Presidente</i>	Professora Doutora Filomena Viana	DEMM - FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Carlos Relvas	DEM - UA
	<i>Orientador</i>	Professor Vítor Martins Augusto	DEMM - FEUP

AGRADECIMENTOS

Sendo a gratidão um dos pilares base da vida em sociedade e, indubitavelmente, um dos valores pelos quais me rejo, gostaria de nesta parte introdutória deixar uma sincera palavra de apreço a todos aqueles que contribuíram para a concretização desta dissertação:

Ao Engenheiro Vítor Martins-Augusto, agradeço desde já o facto de despertar o meu interesse por esta área ao longo do curso. Agradeço também a oportunidade de realizar o estágio curricular e a dissertação na Norcam, em contacto com tecnologias disruptivas, nas quais tenho o maior interesse e acredito. Um obrigado igualmente por todo o apoio prestado ao longo do trabalho, bem como por tornar uma relação orientador-orientando, o mais saudável possível.

A toda a equipa da Norcam, desde o seu Diretor, o Engenheiro Pedro Vieira de Castro, ao Engenheiro José Freitas, Bruno Couto, Marco Gomes, Bruno Peixoto, Miguel Graça, João Silva, Rúben Costa, Tarcísio Nóbrega e Eugénio Almeida, à Dra. Iola Leite e à Mónica Carvalho. A todos, sem exceção, agradeço o facto de desde o dia em que iniciei o estágio, até ao dia em que termino, se revelaram incansáveis, ajudando-me e aconselhando-me em tudo o que podiam, bem como capacitando-me de toda a autonomia e ferramentas necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Por fim, mas não menos importante, um obrigado a todos eles por me fazerem sentir como se já pertencesse à equipa há alguns anos.

A toda a equipa do CEiiA, em especial ao Engenheiro Manuel Oliveira, ao Engenheiro Bruno Rodrigues e ao André Moura, agradeço o lançamento da temática que originou o trabalho assim como, o apoio prestado durante este e, a oportunidade de o realizar em parceria, permitindo-me conhecer de perto a realidade de um centro de desenvolvimento do produto na vanguarda da tecnologia.

Aos meus amigos, que ao longo dos anos sempre acreditaram em mim e me motivaram, de uma maneira ou de outra, a seguir o meu caminho.

Por fim, à minha mãe e irmã por todo o esforço ao longo dos anos. Elas são, indubitavelmente, as maiores responsáveis pela realização deste trabalho, sem elas não teria sido possível.

A todos, OBRIGADO!

RESUMO

O presente trabalho surge no âmbito da dissertação relativa à obtenção do grau de mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este reporta ao estágio curricular realizado na Norcam - Engenharia e Design Industrial, cujo principal foco foi a realização de um projeto, em parceria com o CEiiA, visando o desenvolvimento de produto e otimização topológica, para fabricação aditiva, de um componente integrante do *AUV Medusa Deep Sea*.

Numa fase primária desta dissertação, é feita uma breve revisão ao estado de arte do desenvolvimento do produto, sendo ainda abordadas algumas das novas soluções, oferecidas pela fabricação aditiva, ao design de um componente. Dessa forma, aborda-se também inicialmente a fabricação aditiva, mais concretamente a metálica. Efetua-se ainda uma descrição do equipamento no qual se irá realizar o fabrico do componente, do equipamento que deu origem à problemática, bem como das ferramentas usadas para chegar à solução final.

O principal objetivo deste trabalho é obtenção de uma nova solução a um componente já existente, esta deve possuir menor necessidade de montagem de componentes e menor peso, além disso, é também fator relevante que esta nova solução apresente um tempo e custo de fabrico competitivo com a solução atualmente existente. Para atingir os objetivos, efetuou-se a uma análise dos requisitos do componente, recorrendo-se posteriormente a simulações de otimização topológica para aquisição de uma geometria considerada ideal. Após etapas de modelação e simulação FEA, obteve-se um modelo considerado adequado aos objetivos, seguindo-se a preparação e simulação do processo de fabrico.

Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre a solução desenvolvida nesta dissertação e a solução atualmente existente, verificando-se que a nova solução apresenta uma redução de 9 peças para apenas 1, uma redução de peso de 57 %, uma redução de 25 % em horas máquina, bem como uma redução no custo de material necessário, podendo, em função de estudos posteriores, este ser superior à solução existente.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização topológica; Fabricação Aditiva;

ABSTRACT

This work was developed within the scope of the dissertation regarding the obtaining of the master's degree in Metallurgical and Materials Engineering, by the Faculty of Engineering at the University of Porto. This one reports to the curricular internship at Norcam - Engenharia e Design Industrial, whose the main focus was the realization of a project, in partnership with CEiiA, aiming the product development and topological optimization, for additive manufacturing, of a component present on the AUV Medusa Deep Sea.

In a early stage of this dissertation, a brief review of the state of the art of product development is made, and are also addressed some of the new solutions offered by additive manufacturing to the design of a component. In this way, it is also approached the additive manufacturing, more specifically the metal additive manufacturing. It is also done a description of the equipment in which the component will be manufactured, the equipment that gave rise to the problem, as well as the tools used to reach the final solution.

The main goal of this work is to obtain a new solution to an existing component, it must have less need for assembly and less weight, besides, it is also a relevant factor that this new solution presents a time and cost of manufacturing competitive with the solution that currently exists. To reach the objectives, an analysis of the component requirements was carried out and, afterwards, was used topological optimization simulations to acquire an ideal geometry. After modeling stages and FEA mechanical analysis, a model considered adequate to the objectives was obtained. After that the preparation and simulation of the manufacturing process was done.

Finally, a comparative analysis between the solution developed in this work and the existing solution was carried out. There we can see that the new solution has a reduction of 9 parts for only 1, a reduction of weight of 57%, a reduction of 25 % in machine hours, as well as a reduction in the cost of the material, which may be higher than the existing solution, depending on the outcome of subsequent studies.

KEY-WORDS

Topological Optimization; Additive Manufacturing;

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
PALAVRAS-CHAVE	ii
ABSTRACT	iii
KEY-WORDS.....	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DA NORCAM.....	1
1.2. APRESENTAÇÃO DO CEIIA.....	1
1.3. ÂMBITO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.4. CONTRIBUTO DO TRABALHO	2
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. COMPUTER AIDED DESIGN (CAD)	5
2.2. COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE).....	5
2.3. COMPUTER AIDED MANUFACTURING (CAM)	6
2.4. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	7
2.4.1. DESIGN GENERATIVO	9
2.5. METAL ADDITIVE MANUFACTURING	11
2.5.1. POWDER BED FUSION.....	12
3. ADIRA AM.....	14
4. AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE - MEDUSA DEEP SEA	15
5. METODOLOGIA.....	16
5.1. SOFTWARES UTILIZADOS.....	17
5.1.1. AUTODESK FUSION 360	18
5.1.2. AUTODESK POWERSHAPE	19
5.1.3. AUTODESK NETFABB.....	20
6. TRABALHO DESENVOLVIDO	21
6.1. ANÁLISE DE FORMA DA SOLUÇÃO EXISTENTE.....	22
6.2. RE-DESIGN DO SISTEMA DE SUPORTE	25
6.2.1. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA MANUAL	26
6.2.2. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA AUTOMÁTICA DO MODELO PRÉ-EXISTENTE	27
6.2.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA AUTOMÁTICA PARTINDO DE UM BLOCO	30
6.2.4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS GEOMETRIAS OBTIDAS.....	32
6.2.5. PREPARAÇÃO DO MODELO OBTIDO PARA PRODUÇÃO.....	34
6.3. VALIDAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO MODELO OBTIDO	38
6.3.1. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO	38
6.3.2. RESULTADOS DA FEA	40
6.3.2.1. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO COMPONENTE	40

6.3.2.2.	DESLOCAMENTO RELATIVAMENTE À GEOMETRIA ORIGINAL	41
6.3.2.3.	DEFORMAÇÃO PERMANENTE RELATIVA À GEOMETRIA ORIGINAL	42
6.3.2.4.	COEFICIENTE OU FATOR DE SEGURANÇA	44
6.4.	PREPARAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO	45
6.4.1.	PARÂMETROS MÁQUINA	45
6.4.2.	ORIENTAÇÃO DO COMPONENTE	46
6.4.3.	CRIAÇÃO DE SUPORTES	47
6.4.4.	SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO	48
6.4.4.1.	FLUXO DE TRABALHO DA SIMULAÇÃO	49
6.4.4.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	50
6.4.4.2.1.	DESLOCAMENTO.....	50
6.4.4.2.2.	FALHA DAS ESTRUTURAS DE SUPORTES.....	52
6.4.4.2.3.	INTERFERÊNCIA COM O MECANISMO DE RECOBRIMENTO.....	53
6.5.	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FABRICO SUBTRATIVO E ADITIVO	54
6.5.1.	NÚMERO DE COMPONENTES.....	55
6.5.2.	PESO	56
6.5.3.	TEMPO	56
6.5.4.	CUSTO	57
6.5.5.	DESPERDÍCIO DE MATERIAL.....	58
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
7.1.	CONCLUSÕES	58
7.2.	SUGESTÕES FUTURAS	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXOS	63
	Anexo 1	63
	Anexo 2	63
	Anexo 3	64
	Anexo 4	65
	Anexo 5	66
	Anexo 6	67
	Anexo 7	67
	Anexo 8	68
	Anexo 9	71
	Anexo 10.....	72
	Anexo 11.....	73
	Anexo 12.....	75
	Anexo 13.....	78
	Anexo 14.....	79
	Anexo 15.....	83
	Anexo 16.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Braço robótico, controlado por software CAM, fabricando uma hélice através de deposição de material, utilizando a técnica de fabrico aditivo DED por fio, no porto de Roterdão/RAMLAB - Holanda [9].	7
Figura 2 - Modelo otimizado topologicamente, utilizando o utilitário de otimização topológica presente no Netfabb Ultimate 2018 [13].	8
Figura 3 - Resultado obtido pela GM, utilizando a ferramenta de design generativo da Autodesk para redução de número de componentes e peso nos seus automóveis (adaptado de MetalAM) [17].	11
Figura 4 - Esquema ilustrativo da tecnologia de fabricação aditiva powder bed fusion (adaptado de Varotsis) [22].	13
Figura 5 - Máquina protótipo de fabricação aditiva Adira AM.	14
Figura 6 - Camara de menores dimensões, dentro da área de trabalho da Adira AM, tecnologia Tiled Laser Melting.	15
Figura 7 - Autonomous Underwater Vehicle - Medusa Deep Sea	16
Figura 8 - Fluxograma simplificado, representativo da metodologia utilizada nesta dissertação.	17
Figura 9 - Solução atual para o sistema de suporte do AUV Medusa Deep Sea, originada por assemblagem de diversas geometrias, três principais dimensões e zonas deste.	22
Figura 10 - Sistema de suporte com componentes a ele fixados e respetivo peso em quilogramas.	23
Figura 11 - Zonas (circunferências a vermelho) do sistema de suporte que garantem a união dos diferentes componentes, não podendo ser modificadas.	24
Figura 12 - Representação do AUV Medusa Deep Sea sem carenagem.	24
Figura 13 - Representação de zona da peça fixa e zonas nas quais atuam forças.	25
Figura 14 - Quatro vistas representativas do design obtido após otimização manual do sistema de suporte.	26
Figura 15 - Sistema de suporte manipulado de forma a constituir um único sólido.	27
Figura 16 - Resultado da simulação de otimização topológica realizada recorrendo ao software Autodesk Fusion 360, utilizando o modelo pré-existente como referência.	29
Figura 17 - Bloco desenvolvido para simulação de otimização topológica.	30

Figura 18 - Resultado da simulação de otimização topológica realizada recorrendo ao software Autodesk Fusion 360, utilizando um bloco como referência.	31
Figura 19 - Soluções obtidas em cada uma das três abordagens distintas; a) Otimização manual; b) Otimização automática partindo do modelo pré-existente; c) Otimização automática partindo de um bloco com restrições de design.	32
Figura 20 - Sistema de suporte recebido transformado em um único sólido, possuindo em si sobreposto o modelo, em malha de triângulos, gerado automaticamente após a simulação de otimização topológica.	35
Figura 21 - Exemplo da criação e utilização de arames para a realização de operações booleanas no sólido representativo do sistema de suporte atual unificado.	35
Figura 22 - Geometria CAD obtida após primeiras operações booleanas.	36
Figura 23 - Quatro vistas representativas da geometria final, obtida após preparação do modelo para produção.	37
Figura 24 - comparação entre a) Geometria em malha de triângulos, obtida após otimização topológica e b) modelo final.	38
Figura 25 - Sistema de suporte com cargas e constrangimentos utilizados na simulação por elementos finitos.	39
Figura 26 - Condições de refinamento adaptativo da malha empregues na simulação FEA utilizada.	40
Figura 27 - Resultados obtidos após FEA, expressos em distribuição de tensões no componente.	40
Figura 28 - Resultados obtidos após FEA, expressos em deslocamento do componente, relativamente à posição original.	42
Figura 29 - Resultados obtidos após FEA, expressos em deformação permanente do componente, em relação à forma inicial.	43
Figura 30 - Resultados obtidos após FEA, atentando no coeficiente de segurança.	44
Figura 31 - Orientação escolhida para fabrico do componente.	47
Figura 32 - Suportes do tipo "area with volume support" criados com recurso ao Autodesk Netfabb,	48
Figura 33 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando no deslocamento do componente em milímetros, relativamente à geometria original; a) Final do fabrico; b) após remoção dos suportes;.	51

Figura 34 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando na previsão da falha dos suportes (após término do fabrico).	52
Figura 35 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando na previsão de interferência entre mecanismo de recobrimento e peça, em três estágios distintos do fabrico, t_1 , t_2 e t_3 , onde $t_1 < t_2 < t_3$	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise comparativa entre sistema de suporte atual e três abordagens de otimização topológica abordadas.	33
Tabela 2 - Parâmetros máquina utilizados.	46
Tabela 3 - Comparação entre fabrico subtrativo do sistema de suporte do AUV Medusa Deep Sea e fabrico aditivo da solução proposta.	55

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD - <i>Computer Aided Design</i>
CAM - <i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAE - <i>Computer Aided Engineering</i>
DED - Direct Energy Deposition
PBF - Powder Bed Fusion
CNC - Comando Numérico Computorizado
2D - Duas Dimensões
3D - Três Dimensões
FEA - Finite Elements Analysis
AUV - Autonomous Underwater Vehicle
ASTM - American Society for Testing and Materials

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DA NORCAM

A Norcam - Engenharia e *Design* Industrial Lda é uma empresa fundada em 1991. Esta dedica-se, e tem como principal objetivo, o desenvolvimento e implementação de soluções tecnológicas industriais avançadas, tais como sistemas CAD/CAM/CAE, sistemas de prototipagem rápida e fabricação aditiva, digitalizadores tridimensionais, entre outros meios tecnológicos. A Norcam tem atividade constante em vários países, distribuídos por três continentes.

A equipa da Norcam integra um conjunto de especialistas com experiência comprovada pelas empresas parceiras, nas áreas de *Design* Industrial, CAD/CAM/CAE. Atualmente, esta tem como principal atividade o desenho de soluções integrando *softwares* CAD/CAM da *Autodesk Manufacturing*, mais concretamente o *PowerMILL*, *PowerSHAPE*, *PowerINSPECT* e *FeatureCAM*, a um leque de parceiros dos mais variados segmentos de mercado.

Além das soluções *Autodesk Manufacturing*, a Norcam tem ainda disponíveis soluções para fabrico aditivo da *Markforged*, equipamentos laser de engenharia inversa da HP, *softwares* de simulação de fundição da *Finite Solutions*, equipamentos de medição portátil para grande volume da *Metronor*.

1.2. APRESENTAÇÃO DO CEIIA

O CEiiA, Centro de Engenharia e Desenvolvimento do Produto, foi criado em 1999 com o propósito de apoiar e aumentar a competitividade da indústria automóvel em Portugal. Desde então, e com o passar dos anos, a atividade do CEiiA aumentou focando-se também na aeronáutica, mobilidade e naval/*offshore*, sempre com o intuito de impulsionar a indústria.

Atualmente o CEiiA é, e tem como missão diária, ser uma referência global em investigação, *design*, desenvolvimento, manufatura e realização de testes em produtos e serviços para as indústrias da área da mobilidade.

1.3. ÂMBITO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação e estágio curricular realizaram-se no âmbito da obtenção do grau de mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O principal objetivo deste trabalho foi a realização da otimização topológica de um componente integrante do *AUV Medusa Deep Sea*, um equipamento utilizado em prospeção e mapeamento do fundo oceânico. Esta otimização topológica pretendeu-se, em primeiro lugar, estudar uma alternativa à solução de fabrico atual, via tecnologia de fabrico aditivo, “ainda a dar os primeiros passos”. Com esta solução aditiva, pretendeu-se examinar a possibilidade de diminuir o número de peças que constituem o componente, eliminando todas as etapas e acessórios de montagem, diminuir o peso da solução mantendo os requisitos mecânicos intactos, bem como comparar os tempos e recursos despendidos em cada uma das soluções.

1.4. CONTRIBUTO DO TRABALHO

Num sentido mais geral, além da obtenção dos objetivos ou resolução do problema colocado pelo CEiiA, esta dissertação é um contributo para a validação de novas tecnologias e metodologias de trabalho que visam a redução de peso e número de componentes de sistemas já desenvolvidos ou a desenvolver, bem como a possível diminuição do tempo associado à obtenção de um produto final.

Pretendeu-se, desta forma, apresentar novas ferramentas computacionais, associadas à fabricação aditiva, se podem revelar um poderoso método estimulativo da evolução tecnológica e humana. Paralelamente, e porque todos devemos caminhar nesse sentido, contribuir para um mundo mais verde, seja através da diminuição do peso que, relativo à indústria dos transportes se mede em gastos com combustíveis e gases libertados, seja através da diminuição do desperdício de matérias primas. Assim, deseja-se no limite que, esta dissertação, seja um contributo para a sociedade em geral.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos distintos.

O primeiro capítulo é a “*Introdução*”, nele são apresentadas as partes envolvidas nesta dissertação, bem como o âmbito, objetivos, contribuição e estrutura deste projeto.

O segundo capítulo diz respeito ao “*Estado da Arte*” e, neste é feita uma sintética abordagem teórica ao CAD, CAE e CAM, bem como a novas abordagens ao *design* de um produto. Além disso, é também abordado sinteticamente uma tecnologia de fabrico aditivo metálico, a impressão por laser em cama de pós metálicos.

O terceiro capítulo, “*Adira AM*”, apresenta uma descrição do equipamento protótipo de impressão 3D no qual, o componente desenvolvido será posteriormente fabricado.

O quarto capítulo, “*Autonomous Underwater Vehicle - Medusa Deep Sea*”, aborda o produto que deu origem ao problema proposto para esta dissertação, no qual a peça otimizada será posteriormente aplicada.

O quinto capítulo, “*Metodologia utilizada*”, expõe a abordagem usada na tentativa da obtenção dos objetivos propostos, descreve ainda, de um modo sumário, os *softwares* utilizados e o porquê da sua escolha.

O sexto capítulo, “*Trabalho desenvolvido*”, é onde se expõe e explica todo o trabalho efetuado, desde a análise da problemática, o *re-design* do componente, a validação das propriedades mecânicas, a preparação do processo de fabrico e uma análise comparativa entre a solução desenvolvida e a solução prévia.

Por fim, o sétimo capítulo, “*Considerações finais*”, apresenta as conclusões obtidas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Os equipamentos de fabrico são e tem sido ao longo dos anos parte integrante e fulcral do desenvolvimento tecnológico das sociedades, não sendo de todo descabido ou exagerado se for considerado que as máquinas controlam diretamente o desenvolvimento industrial. Convencionalmente, os equipamentos de fabrico, trabalhavam isolados e eram controlados diretamente por operadores, com o

aparecimento dos computadores, o paradigma mudou e estes, juntamente com as máquinas mantêm uma relação de simbiose que permite controlar e provocar contínuos avanços tecnológicos [1].

Desta forma o computador é, e vem sendo, parte essencial no desenvolvimento de um produto, este está presente nas várias etapas da concepção de componentes, mesmo nos vulgarmente conhecidos como métodos de fabrico tradicionais. Assim, tal como era de esperar, nos mais recentes métodos de fabrico, como a fabricação aditiva, as capacidades computacionais são cada vez mais essenciais, sendo fundamental a utilização de *softwares* para o correto desenvolvimento de componentes, no menor tempo possível, com o menor custo associado e com a melhor qualidade final.

Assim, o desenvolvimento de novos produtos atingiu, com os anos e, consequentemente, com o desenvolvimento tecnológico o paradigma atual, no qual existe uma crescente complexidade no âmbito das funcionalidades, bem como uma crescente preocupação com questões ambientais e monetárias, consequência da contínua busca pela melhor qualidade de vida da sociedade contemporânea. Fruto destas necessidades, a fabricação aditiva evoluiu de um processo de prototipagem para um processo de fabrico, originando com ela novas formas de abordar o *design* de um componente, surgindo, naturalmente, uma nova forma de trabalhar a concepção de um produto. Contudo, fatores como o conhecimento de diferentes domínios são cada vez mais necessários, tais como o conhecimento dos processos existentes, os materiais, seu comportamento e manufatura, a modelação, os *hardwares*, os *softwares* e todo um conhecimento experimental previamente gerado, são essenciais para uma correta contribuição na melhoria do quotidiano humano [2].

Assistimos atualmente à emersão de novas tecnologias a ritmos acelerados, assumindo estas um papel fulcral nos processos de desenvolvimento do produto, capacitando o processo de novas realidades, cujas repercussões afetam, não só o tempo produtivo e a pegada ecológica associada, mas também todo o trabalho das partes envolvidas [2].

No anexo 1, encontra-se um fluxograma adaptado, representativo do ciclo de desenvolvimento e concepção de um produto, no qual se visualiza que as competências computacionais são parte essencial.

2.1. COMPUTER AIDED DESIGN (CAD)

Computer Aided Design ou vulgarmente CAD, que traduzido em português significa o Desenho Assistido por Computador é, a utilização do cálculo computacional para auxílio no desenho e conceção de modelos 3D virtuais. Assim sendo, o CAD é uma ferramenta essencialmente utilizada na fase inicial de desenvolvimento do produto, ele tem a função de dar forma à ideia [3, 4].

Anteriormente ao CAD, a modelação era levada a cabo por mão de obra especializada na realização de desenhos técnicos 2D que representavam fielmente a geometria e dimensões do produto. No entanto, nem toda a gente estava familiarizada com este tipo de desenhos, e de modo a ser facilitada a visualização do produto antes de fabrico, passou a ser necessária a representação deste em três dimensões. Esta representação passou a ser efetuada com recurso a *softwares* de desenho que, além de tornarem a representação mais fácil, tornaram o desenvolvimento do produto mais expedito [3, 4].

Os *softwares* CAD tem, ao longos dos anos, sofrido tremendas evoluções permitindo atualmente, através de poderosos algoritmos, realizar uma grande panóplia de operações, facultando ao operador uma grande liberdade. De um modo cronológico, no início era apenas permitido a criação de modelos 3D em arames, seguindo-se a possibilidade de criação de superfícies representativas de geometrias, a possibilidade de modelação em sólidos e, por fim, a modelação por vóxeis. Existem, nos dias de hoje, um grande número de *softwares* CAD, nos quais podem até ser incluídos os recentes *softwares* de *design* generativo [3, 4].

2.2. COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE)

Computer Aided Engineering, vulgarmente conhecido pela sigla CAE, é o termo usado quando se refere à utilização do computador como um assistente à engenharia. Por outras palavras, CAE é o recurso a *softwares* que analisam o modelo CAD, permitindo prever se este se encontra adequado para a sua função final, antes de proceder à produção final deste mesmo modelo CAD. Além disso é também um *software* CAE aquele que é capaz de simular através de modelos matemáticos o processo de fabrico, permitindo prever e corrigir falhas que possam ocorrer durante este, bem como o comportamento em serviço [3].

A Engenharia assistida por computador permite um menor tempo de desenvolvimento de produto e assegura uma maior confiabilidade no produto que se está a desenvolver, uma vez que validações e otimizações podem ser efetuadas sem se ter procedido ao fabrico [3].

Dependendo do tipo de simulação a efetuar, podem ser utilizados vários princípios distintos. No entanto, dois destes são particularmente importantes neste trabalho, os elementos finitos e as diferenças finitas. Estas duas abordagens diferem na maneira como dividem o modelo CAD. Em elementos finitos (FEA) o modelo é convertido numa malha tridimensional, na qual os pontos são interligados por vetores. Uma vez criada a malha é possível, por exemplo, calcular as tensões resultantes de forças aplicadas aos “nós”, visto que existe informação direcional disponibilizada pelos vetores que os ligam. As simulações FEA são muito utilizadas para cálculo de propriedades mecânicas. Por sua vez, as simulações por diferenças finitas têm como base uma malha composta por cubos unitários (“vóxeis”) com as mesmas dimensões e, a simulação, consiste na transferência de propriedades entre cubos vizinhos. Este tipo de simulação é mais indicado para análises de arrefecimento ou solidificação de materiais [3, 5, 6].

2.3. COMPUTER AIDED MANUFACTURING (CAM)

Os *softwares* CAM, *Computer Aided Manufacturing*, em português, Manufatura Assistida por Computador, são *softwares* que surgem para auxiliar e acelerar o desenvolvimento e fabrico de um produto, realizando uma ponte entre computador e máquina, onde o computador gera e controla todas as operações de fabrico, direta ou indiretamente, através de uma linguagem capaz de ser lida pelas máquinas, comumente designado Comando Numérico ou NC [1, 7, 8].

Existem vários *softwares* CAM, nestes é carregado um ficheiro com a geometria da peça, obtida através de *softwares* CAD e à qual se irão aplicar estratégias que, sumariamente, definem os percursos realizados pelas ferramentas. Após criadas, estas estratégias serão escritas de forma automática num programa NC, constituído por valores numéricos e alfanuméricos. O programa NC é, no fim, transferido para a máquina que possuiu um controlador CNC capaz de ler o programa

NC e indicar precisamente à máquina que movimentos deve fazer de modo a executar criteriosamente o que foi definido no *software* CAM [1, 3, 7].

No entanto, os constantes avanços e necessidades industriais conduzem à necessidade de melhoramento e alteração dos equipamentos e *softwares* utilizados. Hoje existem *plug-ins* e *softwares* com mais e melhores capacidades, exemplo disso é a utilização de células robóticas, bem como estratégias de deposição de material que funcionam aditivamente e de um modo antagónico às estratégias subtrativas. Na figura 1, pode-se visualizar um braço robótico a executar comandos, gerados num *software* CAM, fabricando uma hélice para a indústria naval, através da deposição de material.



Figura 1 - Braço robótico, controlado por *software* CAM, fabricando uma hélice através de deposição de material, utilizando a técnica de fabrico aditivo DED por fio, no porto de Roterdão/RAMLAB – Holanda [9].

2.4. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A busca pela diminuição do peso dos componentes sempre foi um grande objetivo dos diversos tipos de indústrias. No entanto, as empresas atingiram um determinado estado onde através de tecnologias de fabrico tradicionais, se tornou difícil a redução de massa nos componentes. Contudo, com o recente crescimento das tecnologias de fabrico aditivo e com a liberdade de forma por elas oferecida, as empresas perceberam que novas soluções podem ser exploradas. Pode-se considerar que atualmente se encontra uma mudança a ocorrer na fabricação de componentes, esta é alimentada pela quarta revolução industrial e moldada pela transformação digital. Assim, os *softwares* utilizados são fulcrais ao desenvolvimento de novos

componentes, contudo, pode-se afirmar que um *software* CAD tradicional foi desenvolvido debaixo de uma visão subjacente também ela em processos de fabrico tradicionais ou subtrativos. Desta forma, assiste-se recentemente à necessidade e criação, por parte dos fabricantes de *softwares*, de produtos com modos de trabalho baseados em visões mais atuais/aditivas.

O fabrico aditivo, como um método de manufatura, apenas atinge o seu potencial pleno quando usado para criação de geometrias complexas impossíveis ou muito difíceis de fabricar por outro método de fabrico. Assim, com ferramentas recentemente adicionadas aos *softwares* CAD ou mesmo com novos *softwares*, torna-se possível introduzir nos componentes novas formas, tais como geometrias que utilizam a menor massa possível, de modo a que o componente suporte as tensões às quais se encontra sujeito em serviço, estruturas em rede que o tornam oco, ou até a criação de *designs* orgânicos, isto é, *designs* que não levam em consideração qualquer geometria prévia e são gerados em função das cargas a que o componente estará sujeito. Assim torna-se possível obter componentes com menor massa e que continuam respeitando os requisitos mecânicos [10, 11].

A otimização topológica é geralmente uma abordagem matemática que utiliza as capacidades de cálculo oferecidas pelos computadores de modo a, dentro de uma zona predefinida, para um determinado conjunto de cargas e condições de fronteiras, fornecer uma otimização geométrica do componente. O resultado fornece um componente otimizado [12].

Na figura 2, pode-se visualizar uma geometria otimizada, através da criação de estruturas em rede, utilizando o *software Autodesk Netfabb* (abordado nesta dissertação).



Figura 2 - Modelo otimizado topologicamente, utilizando o utilitário de otimização topológica presente no Netfabb Ultimate 2018 [13].

A otimização topológica, não é usualmente uma tarefa simples de executar manualmente por um operador CAD. A maioria das pessoas que laboram nesta área foram preparadas para criar modelos que tem em conta as várias limitações dos processos convencionais, não consentindo esse facto, por vezes, uma visão mais alargada e sem fronteiras, sendo difícil quebrar velhos hábitos. Contudo e tal como referido anteriormente, os softwares CAD continuam a evoluir de modo a acompanhar a rápida revolução do fabrico aditivo, incorporando ferramentas que permitem otimizações de um modo mais expedito e, por vezes, automático [10].

No anexo 2, encontra-se um esquema ilustrativo no qual se pode visualizar, uma geometria convencional desenvolvida para determinada aplicação e sua posterior otimização topológica. Além disso, no anexo 3 encontra-se também, como demonstração das potencialidades destas ferramentas e para futuros ensaios mecânicos comparativos, uma peça exemplo desenvolvida durante a dissertação, na qual foram criadas com recurso ao *Autodesk Netfabb*, estruturas em rede. Esta foi impressa recorrendo a uma impressora de extrusão de polímeros da *Markforged*. No entanto, salienta-se que as impressoras que usam esta tecnologia não são as mais indicadas para a impressão destas estruturas em peças de pequenas dimensões.

2.4.1.DESIGN GENERATIVO

Tal como referido anteriormente, a otimização topológica pode ser efetuada de duas maneiras distintas, sendo a primeira uma otimização que considera uma geometria pré-existente assim como as cargas às quais essa geometria estará sujeita em serviço e, por sua vez, o segundo método de otimização é o *design* generativo, tendo este tipo de modelação em conta, essencialmente os esforços a que o componente estará sujeito em serviço e os requisitos de *design*.

O *design* generativo é um conceito que surge para se referir a um *design* mecânico gerado por um algoritmo, este apresenta-se hoje como algo revolucionário que promete, através da relação simbiótica que mantém com a fabricação aditiva, eliminar fronteiras limitadoras da engenharia de desenvolvimento de produto, conseguindo, para determinada aplicação, *designs* próximos do ideal em termos de resistência específica. Este tipo de *design* combina a criatividade do engenheiro, a inteligência artificial e o poder computacional em *cloud* para produzir uma lista de vários modelos prontos para manufatura aditiva, a partir da qual se escolhe o modelo

que melhor se adequa às necessidades do problema. De certa forma, pode-se afirmar que o *design* generativo translada a abordagem evolutiva da natureza, em função de estímulos, para o *design* de produtos, permitindo com isto a obtenção de componentes mais leves, que demoram menos tempo a serem desenvolvidos e que mantêm o respeito dos requisitos mecânicos [14-16].

O fluxo de trabalho de obtenção de um modelo generativo compreende essencialmente quatro etapas [14, 16]:

- Introdução num *software* de *design* generativo, os objetivos de *design* e as restrições a ele aplicadas, tais como, tipo de material, peso, resistência mecânica ou tipo de esforços que terá de resistir, custos, entre outros;
- O computador utiliza algoritmos e ferramentas de cálculo para gerar diversos *designs* possíveis para as restrições aplicadas, correndo automaticamente uma análise de performance para estes;
- Visualização, por parte do humano, das soluções oferecidas, eventual modificação das restrições e regeneração dos *designs*. Intuição e experiência humana, aliadas à inteligência artificial computacional, identificam o *design* mais relevante para o problema, selecionando-o;
- Por fim, fabrica-se o protótipo ou componente final por fabricação aditiva. Como já referido, a fabricação aditiva é o método de fabrico que mais pode beneficiar este tipo de *design*, contudo, em função das geometrias geradas, pode ser possível o seu fabrico por outro tipo de manufatura, cabe ao humano visualizar e decidir;

O *design* generativo apresenta diferenças, que por vezes se revelam como vantagens, em relação ao *design* tradicional, este promete poupanças de tempo, aumento da criatividade, pois os algoritmos geram geometrias dificilmente imaginadas pelos humanos, poupanças económicas, sendo que simulações e testes são realizados numa fase prévia do desenvolvimento e, por fim, a criação de geometrias próximas da performance ideal [14, 16].

Na figura 3, encontra-se representado um resultado obtido pela *General Motors*, em parceria com a *Autodesk*, utilizando o *design* generativo para um problema de redução do número de componentes e otimização topológica.

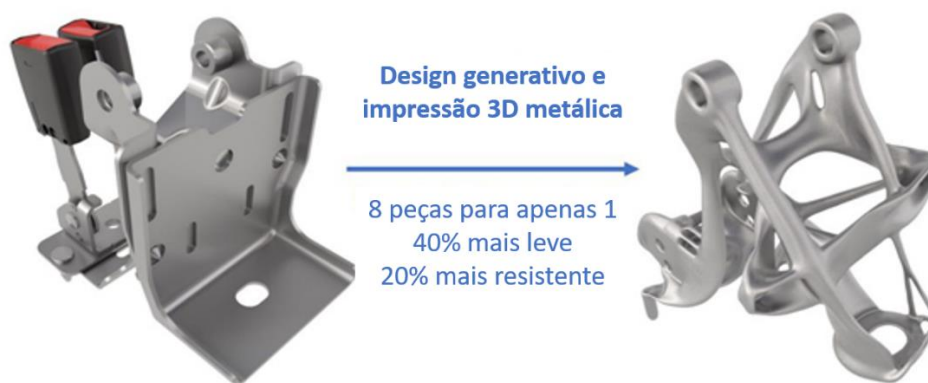


Figura 3 - Resultado obtido pela GM, utilizando a ferramenta de design generativo da Autodesk para redução de número de componentes e peso nos seus automóveis (adaptado de MetalAM) [17].

A GM é um dos grandes grupos automóvel que se encontra a apostar no *design* generativo como uma tecnologia chave para o desenvolvimento de novas soluções nos seus veículos, de modo a atingir reduções de peso e número de componente impossíveis de atingir recorrendo a técnicas de otimização de *design* tradicionais. Para a GM, este é o início de uma parceria de vários anos com a *Autodesk*, que através do *design* generativo, fabricação aditiva e ciência de materiais se revelará uma oportunidade única para o acelerar do desenvolvimento dos veículos de futuro [17].

Além da GM, vários grupos empresariais visualizam nestas novas abordagens uma oportunidade única. Uma breve busca nos motores de pesquisa comuns compravam este facto, veja-se, como exemplo, a estrutura biônica da *Airbus* intitulada “*Airbus bionic 3D printing*” (referência bibliográfica [18]), ou o *calliper* desenvolvido pela *Bugatti* para o modelo *Chiron*, presente na imagem do anexo 4, que mantém as especificações mecânicas reduzindo o peso do componente em cerca de 40% [19].

2.5. METAL ADDITIVE MANUFACTURING

A fabricação aditiva é definida pela ASTM como um processo de união de materiais, capaz de produzir objetos a partir do modelo 3D, usualmente camada a camada, opondo-se assim às metodologias de fabrico subtrativo, que não adicionam material, mas sim removem. Esta definição é aplicável às diferentes classes de materiais, incluindo metais, cerâmicos, polímeros, compósitos e sistemas biológicos [20].

Apesar de não ser um conceito moderno (a fabricação aditiva surge com a prototipagem rápida há algumas décadas), apenas recentemente começa a emergir como uma importante tecnologia de fabrico comercial. Atualmente, o fabrico aditivo de polímeros é um exemplo de sucesso, com diversas tecnologias bastante evoluídas e capazes de produzir componentes que concorrem com componentes produzidos por outro método mais tradicional. Ultimamente, o foco da investigação e desenvolvimento voltou-se para a fabricação aditiva de componentes metálicos, visualizando-se grande grupos empresariais, como por exemplo a *General Eletric*, a investirem fortemente no desenvolvimento destas tecnologias. O objetivo é de fácil compreensão e passa por produzir componentes mais leves, de uma forma mais rápida, com menor necessidade de montagem, menor desperdício de material, geometrias inatingíveis de outra forma e menor pegada de carbono associada. Apesar de algo em pleno desenvolvimento, as empresas encaram já a fabricação aditiva metálica como uma solução, existindo hoje componentes fabricados e comercializados com recurso a esta tecnologia.[20, 21].

Tal como os outros materiais possíveis de produzir aditivamente, também a impressão 3D metálica possui diversas técnicas associadas, de entre as quais se pode destacar *powder bed fusion* (que será abordada e utilizada durante esta dissertação) e *direct energy deposition*, com pós granulados ou por fio. Existem outras técnicas secundárias, tais como as que extrudem partículas metálicas com ligante, recorrendo a posterior sinterização. É de esperar nos próximos anos, além da melhoria das técnicas atuais, o surgimento de novas metodologias.

2.5.1. POWDER BED FUSION

Powder bed fusion é a técnica de fabricação aditiva metálica mais utilizada, esta pode ser classificada de duas formas distintas, atendendo à fonte de energia utilizada, feixe de laser ou feixe de eletrões [21, 22].

O processo de fabrico de um componente por *powder bed fusion* é cíclico, repetindo-se desde a primeira até à última camada de material. Existem ligeiras variações no processo dependendo do modo de fornecimento de energia, contudo tendo como exemplo o fornecimento de energia através de um feixe de laser, de um modo simplista, o processo pode ser descrito da seguinte forma [21, 22]:

- I. A câmara de construção é primeiramente preenchida com gás inerte (por exemplo árgon), de modo a minimizar a oxidação do pó metálico aquando da fusão. Após este preenchimento, é efetuado um aquecimento de modo a atingir uma temperatura ótima de fabrico (que minimiza gradientes térmicos durante o fabrico);
- II. Com auxílio de um rolo de recobrimento ou lâminas de varredura próprias, uma fina camada de pó metálico é distribuída uniformemente sobre a plataforma de construção. Um laser varre a geometria correspondente à primeira camada da peça, provocando a fusão dos pó metálicos. Desta forma origina-se a primeira camada do componente desejado.
- III. Após completa a primeira camada, a plataforma de construção desce o correspondente à espessura de uma camada e o mesmo mecanismo de varrimento de pó é aplicado, formando novo substrato uniforme. O laser volta a fazer um varrimento que provoca nova fusão dos pó. O processo repete-se assim até à conclusão da peça.

Na figura 4, encontra-se um esquema simplista representativo desta técnica de fabricação aditiva.

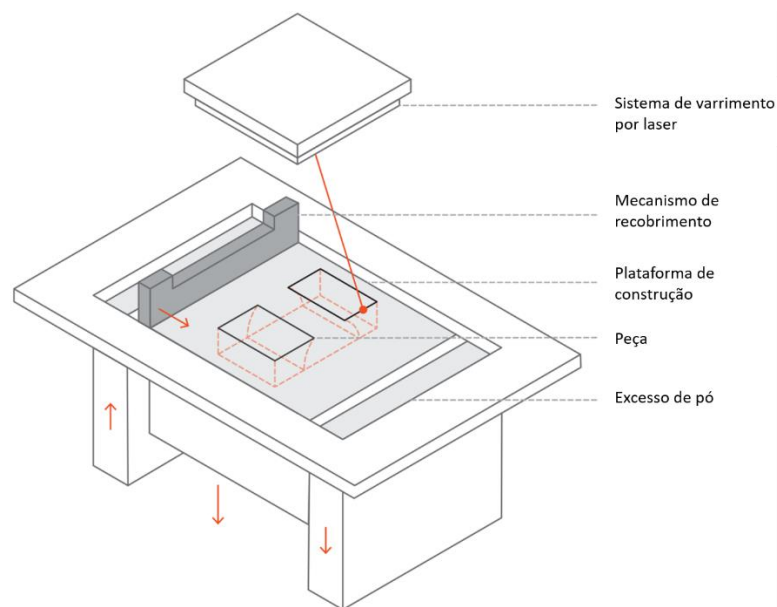


Figura 4 - Esquema ilustrativo da tecnologia de fabricação aditiva powder bed fusion (adaptado de Varotsis) [22].

Quando a construção do componente finaliza, este encontra-se coberto por pó e fixo à plataforma através dos suportes, suportes esses que são do mesmo material

que o componente produzido, uma vez que são originados camada a camada, simultaneamente com o componente. Torna-se, portanto, muito importante mitigar as tensões que serão introduzidas durante o processo de fabrico, de modo a prever e prevenir possíveis distorções. Estas causam falhas que podem impedir a validação do componente, bem como causar danos avultados no equipamento de fabrico [22].

Uma vez atingida uma temperatura ambiente, o pó em excesso é removido manualmente e o conjunto peça, plataforma e suporte pode ou não ser sujeito a um tratamento térmico de alívio de tensões. Finalmente, o componente é separado da plataforma e os suportes são removidos, recorrendo a máquinas de corte, maquinagem ou corte por fio, obtendo-se a peça pronta para uso ou mais pós-processamento [22].

3. ADIRA AM

A Adira é uma empresa portuguesa com mais de 60 anos, conhecida internacionalmente pelo fabrico de maquinaria capaz de trabalhar chapa metálicas, tais como equipamentos de conformação plástica ou corte por laser. Atualmente, a empresa apostou na fabricação aditiva, desenvolvendo o equipamento Adira AM [23].

Adira AM é uma máquina protótipo de fabricação aditiva que combina no seu interior os processos *powder bed fusion* e *direct energy deposition*. Na figura que se segue, encontra-se uma imagem do equipamento protótipo em questão, de momento alojada nas instalações do CEiiA [24].



Figura 5 - Máquina protótipo de fabricação aditiva Adira AM.

Sendo que, combinar os dois processos já era um grande desafio, a Adira foi mais longe e introduziu na Adira AM a possibilidade de construção de peças metálicas de grandes dimensões com a tecnologia *powder bed fusion*. Uma vez que, dentro da camara de construção é obrigatório a manutenção de gás inerte e a área de trabalho da Adira AM é consideravelmente grande (1000 mm x 1000 mm x 200 mm), a Adira introduz um novo conceito, denominado de *Tiled Laser Melting*. Este consiste simplesmente na introdução dentro da área de trabalho de uma camara menor (250 mm x 250 mm), na qual se encontra o laser e uma atmosfera com gás inerte, sendo esta capaz de se mover, mantendo a atmosfera controlada, durante o varrimento do laser numa camada da peça. Na figura 6, pode-se visualizar o a camara de menores dimensões dentro da área de trabalho [24].

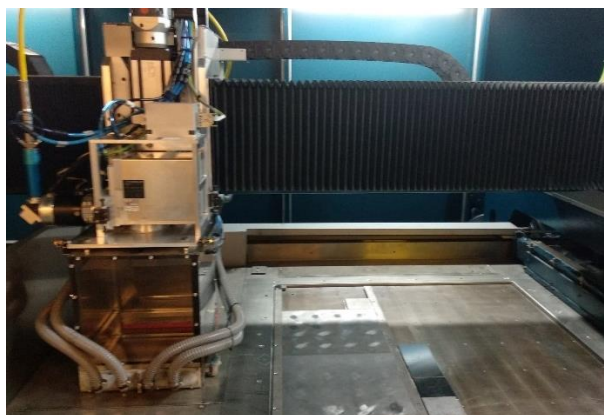


Figura 6 - Camara de menores dimensões, dentro da área de trabalho da Adira AM, tecnologia *Tiled Laser Melting*.

4. AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE - MEDUSA DEEP SEA

O *Medusa Deep Sea* é um submarino autónomo, capaz de atingir os três mil metros de profundidade, desenvolvido e produzido em Portugal, através de um consórcio entre Instituto Superior Técnico (IST), Centro de Engenharia e Desenvolvimento do Produto (CEiiA), Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), a Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental (EMEPC) e o Instituto do Mar (Imar) [25-27].

O desenvolvimento deste AUV teve em conta o facto de não existir mais nenhum equipamento com esta tecnologia em Portugal, existirem poucos em todo o mundo (os que existem encontram-se normalmente associados a empresas de

exploração petrolífera) e o facto de Portugal possuir uma grande parte da área do seu território submersa e sem qualquer tipo de informação associada. Assim sendo, o principal objetivo do *Medusa Deep Sea* é o registo de um agregado de dados que, entre outras coisas, permite o mapeamento dos fundos oceânicos nacionais, até profundidades de cerca de três quilómetros, enquanto colabora com outros dispositivos à superfície [25-27].

O *AUV Medusa* tem como missões essenciais: Reforçar a capacidade nacional autónoma de exploração e monitorização em águas profundas. Proporcionar aos cientistas e operadores comerciais em Portugal meios necessários para iniciar o estudo e, possivelmente, exploração do fundo oceânico. Acelerar a capacidade de desenvolvimento nacional nos domínios do fundo do mar, sendo o primeiro passo para um longo percurso efetuado autonomamente [25-27].

Atualmente o *Medusa Deep Sea* já efetuou testes em águas abertas, encontrando-se em fase de verificação e otimização. Na imagem da figura 7, apresenta-se uma imagem do AUV em questão.



Figura 7 - Autonomous Underwater Vehicle - Medusa Deep Sea

5. METODOLOGIA

Após perceção de toda a problemática do trabalho proposto, estudaram-se quais as abordagens que permitiriam, atingir os objetivos propostos inicialmente. Desta forma, chegou-se a uma metodologia capaz de esmiuçar o problema de otimização topológica, redução de peso e desenvolvimento do produto para

impressão 3D, passando esta numa etapa primária pelo módulo de simulação de otimização topológica presente no *Autodesk Fusion 360*.

Assim, na figura que se segue, encontra-se representado um fluxograma simplificado da abordagem aplicada. Neste é ainda possível visualizar os *softwares* usados, bem como o *timing* de sua utilização.

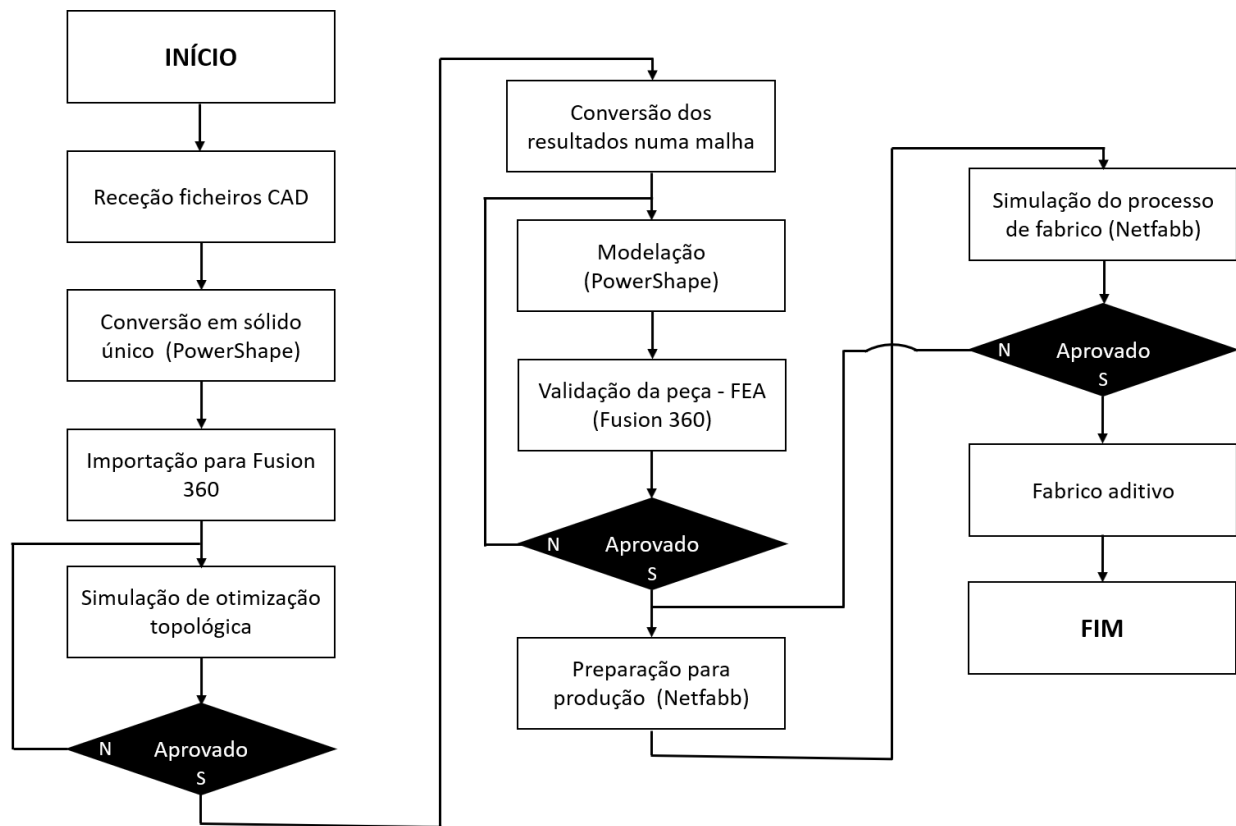


Figura 8 - Fluxograma simplificado, representativo da metodologia utilizada nesta dissertação.

5.1. SOFTWARES UTILIZADOS

Nos próximos tópicos são abordados os *softwares* utilizados, durante esta dissertação de mestrado, com o intuito de atingir os objetivos inicialmente propostos.

Sendo este um trabalho realizado numa parceria entre empresas, existia a possibilidade de utilização de diversas soluções, assim, após uma ligeira descrição do *software*, fornece-se a justificação para a sua escolha.

5.1.1.AUTODESK FUSION 360

O *Fusion 360* é um software baseado em *cloud* bastante completo que possui um leque de ferramentas CAD/CAM/CAE para desenvolvimento do produto. Este é um *software* com uma boa curva de aprendizagem e que combina ferramentas fáceis e rápidas de *design* orgânico com ferramentas mais tradicionais precisas de modelação sólida, permitindo a génese de geometrias adequadas ao processo de fabrico [28].

À medida que uma geometria surge, ela pode ser validada e otimizada recorrendo os recursos de simulação presentes no *software*. Após toda a etapa de validação do *design*, o *Fusion 360* fornece também recursos CAM, isto é, permite uma geração rápida de percursos de ferramenta para equipamentos CNC ou, caso o processo de fabrico desejado seja aditivo, permite enviar o projeto para um equipamento de impressão 3D [28].

Apresentado pela *Autodesk* como o *software* de próxima geração, funciona tanto em MAC, como PC ou dispositivos móveis, permitindo desta forma uma maior facilidade de trabalho em equipa, o que poderá ser capaz de aumentar a produtividade em determinados casos [28].

No anexo 5, encontra-se representada uma imagem da interface CAE do *Autodesk Fusion 360*, com a peça em estudo nesta dissertação em simulação para otimização topológica.

Após perceção da impossibilidade de utilização de *softwares* de design generativo por ainda não se encontrarem disponíveis no mercado aquando do início desta dissertação, optou-se pela utilização do *Fusion 360* por se tratar de um *software* que possui ferramentas inovadoras de otimização topológica, capazes de se aproximarem do *design* generativo e possibilitadoras do alcance dos objetivos do projeto. Trata-se também de um *software* no qual é possível executar simulação de aplicação de cargas de serviço, permitindo numa etapa posterior testar a solução desenvolvida e, além do exposto anteriormente, era um programa no qual se possuía o interesse de promover um primeiro contacto.

5.1.2. AUTODESK POWERSHAPE

O *PowerShape* é uma das várias aplicações CAD de modelação a três dimensões existentes no mercado atualmente. Desenvolvido inicialmente pela *Delcam*, hoje é um dos muitos *softwares* pertencentes ao universo *Autodesk*.

Este *software* permite ao utilizador a criação de geometrias complexas, quer através de operações booleanas em sólidos, quer através da manipulação de superfícies e/ou de modelos de arames [29-31].

O *PowerShape* torna-se uma ferramenta poderosa, quando utilizada corretamente, uma vez que possui diversas características que promovem um menor tempo no ciclo de desenvolvimento do produto, características essas tais como o cursor inteligente, as “*Power Surfaces*”, o “*Smart Surfacers*”, a modelação direta de sólidos, a fácil importação e correção de modelos CAD de outra tipologia de aplicações compatíveis. Este permite também a importação de nuvens de pontos tridimensionais, a partir dos quais cria inteligentemente modelos tridimensionais. Além de todas estas características e das funcionalidades básicas de modelação 3D, o *PowerShape* inclui ainda módulos especialmente desenvolvidos para a criação de elétrodos, engenharia inversa, montagem e *design* de moldações [29-31].

No anexo 6, encontra-se uma imagem, na qual se pode vislumbrar a interface com o utilizador do *PowerShape Ultimate 2018*. Nesta encontra-se a montagem do sistema de suporte em otimização, assim como os componentes a ele acoplados.

O *PowerShape* foi o *software* CAD escolhido, de entre a vasta gama de *softwares* CAD existentes no mercado, uma vez que se perspectivava uma morosa correção do modelo após simulação de otimização topológica. A perspectiva era a necessidade de recorrer a um *software* capaz de gerar superfícies inteligentes, adaptadas a uma determinada malha, ou mesmo, corrigir modelos com recurso a modelação em superfícies, além da necessidade de executar operações entre superfícies, sólidos e malhas. Sendo o *Autodesk PowerShape* considerado um dos melhores *softwares* trihíbridos do mercado, ou seja, capaz de facilmente efetuar facilmente operações entre entidades distintas, tais como sólidos, superfícies e malhas, a escolha recaiu sobre si. Além disso, é um *software* para o qual se possuía conhecimentos prévios, o que permitiu aumentar o tempo de preparação dos modelos.

5.1.3. AUTODESK NETFABB

O *Netfabb* é mais um *software* pertencente ao vasto grupo de *softwares* da *Autodesk*, este surge em resposta à crescente utilização da fabricação aditiva e fornece um alargado leque de ferramentas que permitem unificar o processo de fabrico neste modo de manufatura. Através do seu completo fluxo de trabalho, o *Netfabb* permite uma redução de custos através da diminuição do tempo associado ao desenvolvimento e fabrico de um componente de forma aditiva, sendo considerado um *software* que apesar de recente é bastante versátil e completo, podendo proporcionar um correto aproveitamento das potencialidades deste modo de fabrico [13, 21].

De entre as principais funcionalidades deste *software*, podem-se destacar, a capacidade para importar, analisar e corrigir modelos 3D automaticamente, simular o processo de fabrico de componentes metálicos, prevendo tensões acumuladas das quais resultam distorções de peças, falhas de suportes e possíveis interferências entre peças e *hardware*. Possibilita também o recurso a simulações térmicas do fabrico do componente, o que permite antecipar zonas com falta de fusão ou excesso de temperatura. Outra das principais potencialidades deste *software* é o facto de permitir otimizar geometrias através da criação de estruturas em rede, estruturas estas que podem ser de diferentes tipos (presentes numa base de dados) ou até mesmo criadas de raiz pelo utilizador, diminuindo desta forma o peso dos componentes projetados. Contudo, para se alterar a geometria de um modelo necessita-se possuir exata certeza que este irá desempenhar as suas funções em serviço, pelo que mais uma vez o *Netfabb* fornece simulações por elementos finitos que permitem antecipar as condições de serviço, consentindo ao utilizador verificar se a nova geometria aguenta as solicitações. Em caso negativo, o *software* fornece soluções através de alterações automáticas na densidade ou forma da estrutura em rede, de modo a que a nova estrutura aguente as solicitações. É também possível proceder a alterações manualmente. Além disso, e de todas as ferramentas básicas de *slicing*, criação de suportes, empacotamento e alterações ligeiras no modelo 3D, o *Netfabb* permite integrar modos de fabricação híbrida, anuindo a criação de sobreespessuras de maquinagem, exportando posteriormente de forma direta a geometria para o *PowerMILL*. Através do *Netfabb* é também possível a geração de percursos de fabrico personalizáveis e posterior criação de código capaz de ser lido

pelos equipamentos de impressão. Em meados de maio de 2018, a *Autodesk* lançou associado ao *Netfabb* e ao *Fusion 360*, um utilitário que permite a criação de modelos de forma generativa, além disso, estão também a desenvolver várias melhorias para o *software*, entre elas a possibilidade de trabalho com várias cabeças de impressão [13, 21].

No anexo 7, pode-se visualizar uma imagem da interface do *Autodesk Netfabb Ultimate 2018.3*.

A escolha do *Autodesk Netfabb* como o *software* de fabricação aditiva a utilizar foi simples, pois as opções no mercado para *softwares* de fabricação aditiva não são tão elevadas como, por exemplo, para *softwares* CAD. Contudo, existem mais opções, tais como *Magics* da *Materialise*, *NX* da *Siemens*, *MakePrintable*, *MeshLab*, *Ultimaker Cura*, *Slic3r*, *MatterControl*, entre outros. Todavia, apesar da existência de diferentes opções, nenhuma apresenta um fluxo de trabalho tão completo como o *Netfabb*, recaindo sobre este a escolha. O *Netfabb* apresenta-se como a solução mais completa no mercado, agrupando uma panóplia de ferramentas essenciais ao desenvolvimento do produto para impressão 3D metálica que mais nenhum *software* apresenta. Aliado a isto encontra-se também o facto de ser possível a obtenção de licença para este e, se possuírem ligeiros conhecimentos prévios.

6. TRABALHO DESENVOLVIDO

De forma a atingir o principal objetivo desta dissertação de mestrado, foram fornecidos pelo CEiiA um conjunto de ficheiros CAD representativos da estrutura de suporte do *AUV Medusa Deep Sea* em questão, bem como uma ficha técnica (presente no anexo 8) na qual se encontravam especificadas todas as cargas que esta estrutura necessita suportar em serviço. A partir dos documentos fornecidos procedeu-se a todo um conjunto de trabalhos que visavam sempre o cumprimento dos principais objetivos desta dissertação.

6.1. ANÁLISE DE FORMA DA SOLUÇÃO EXISTENTE

Atualmente, o sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea* já se encontra fabricado e montado com recurso a tecnologias tradicionais de fabrico, tais como maquinagem e aperto mecânico de nove diferentes componentes. O sistema de suporte atual, fabricado em Alumínio 7075 tem uma massa aproximada de 1,7 kg e, utilizando o volume dos componentes e a densidade do aço inoxidável 316L (material no qual é possível imprimir na Adira AM), observa-se que o mesmo componente, fabricado neste tipo de material, possuiria uma massa aproximada de 4,7 kg, não contabilizando todos os componentes de aperto mecânico utilizados no seu fabrico.

Na figura 9, encontra-se representado o sistema de suporte desenvolvido pelo CEiiA. Na mesma, pode-se observar a assemblagem dos diferentes componentes que constituem o sistema de suporte, bem como uma aproximação, em milímetros, às três principais dimensões deste. Além disso, considera-se que este possui três zonas, a traseira, a intermédia e a frontal.

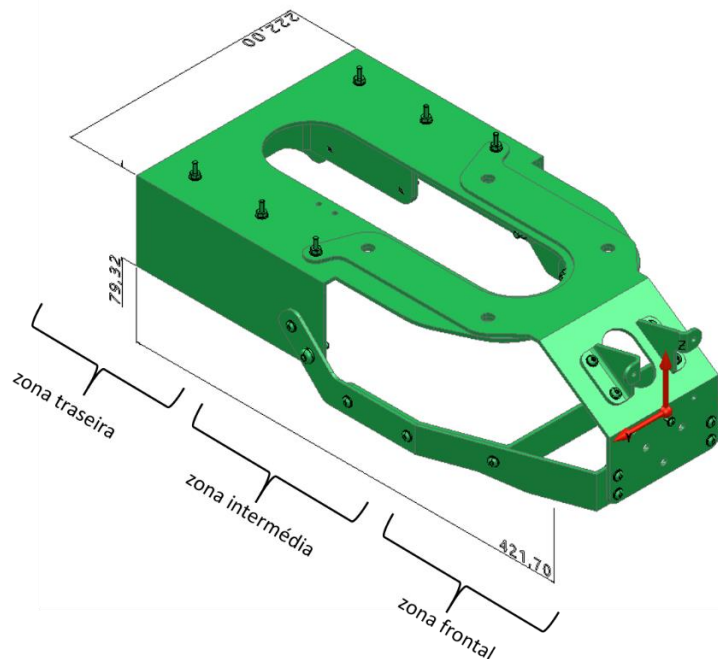


Figura 9 - Solução atual para o sistema de suporte do AUV Medusa Deep Sea, originada por assemblagem de diversas geometrias, três principais dimensões e zonas deste.

Ao modelo representado na figura anterior encontram-se ligados alguns equipamentos e estruturas, esses devem ser totalmente fixos e o sistema de suporte

deve suportar o seu peso, sem deformar a sua geometria ou incorrer em qualquer tipo de falha ou rutura.

Na imagem da figura que se segue encontra-se representado o sistema de suporte, ao qual é possível visualizar os componentes a ele fixos, assim como o peso em quilogramas total de cada um desses componentes.

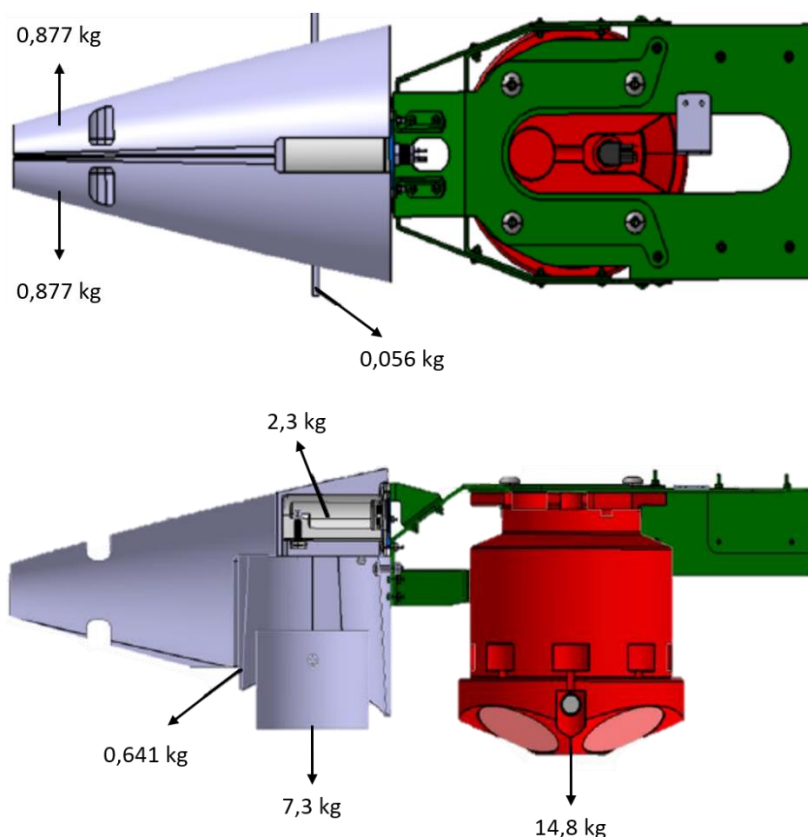


Figura 10 - Sistema de suporte com componentes a ele fixados e respetivo peso em quilogramas.

Analisando a figura 10, visualiza-se que o sistema de suporte encontra a si acoplado na zona frontal aproximadamente 12,1 kg (todos os cálculos arredondados por excesso), por sua vez, na zona intermédia este necessita suportar o peso do componente representado a vermelho na figura, ou seja, 14,8 kg.

Uma vez confirmada a existência de componentes fixos à peça em estudo, verifica-se que existem zonas nesta peça que não podem sofrer alterações, uma vez que farão a união e assegurarão a correta funcionalidade do sistema. Assim sendo, na figura 11, encontram-se representadas por circunferências a vermelhos as zonas do sistema de suporte que não podem ser modificadas. Além disso, nas zonas de contacto é necessária garantir superfícies planares.

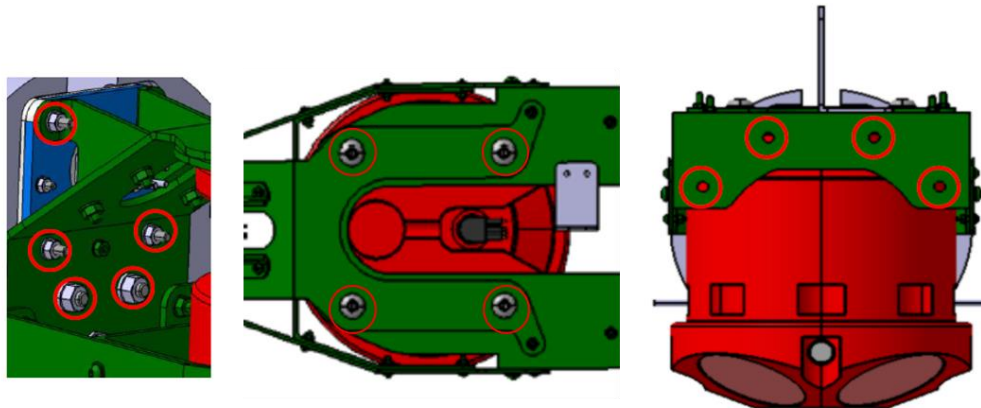


Figura 11 - Zonas (circunferências a vermelho) do sistema de suporte que garantem a união dos diferentes componentes, não podendo ser modificadas.

Os componentes na zona frontal do sistema de suporte encontram-se fixos a este recorrendo a 7 parafusos, por sua vez, o cilindro central encontra-se fixo à zona intermédia do sistema de suporte através de 4 parafusos, enquanto que, na zona traseira existem 4 furos que necessitam ser mantidos, pois é através destes que se fixa o sistema de suporte.

Na figura 12, encontra-se o AUV Medusa Deep Sea sem carenagem, podendo-se visualizar o componente em estudo, bem como os componentes a si acoplados.

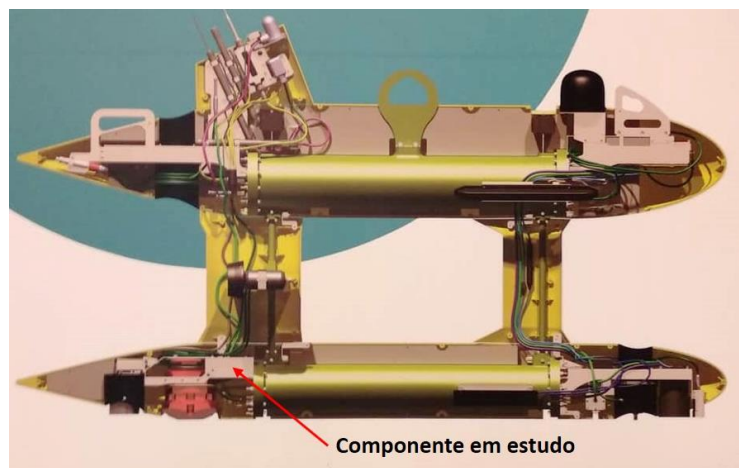


Figura 12 - Representação do AUV Medusa Deep Sea sem carenagem.

Conhecida a zona fixa do sistema de suporte e as zonas nas quais são fixos os diferentes componentes, esses com um peso especificado, sabe-se que no sistema de suporte atuam as forças representadas na seguinte figura.

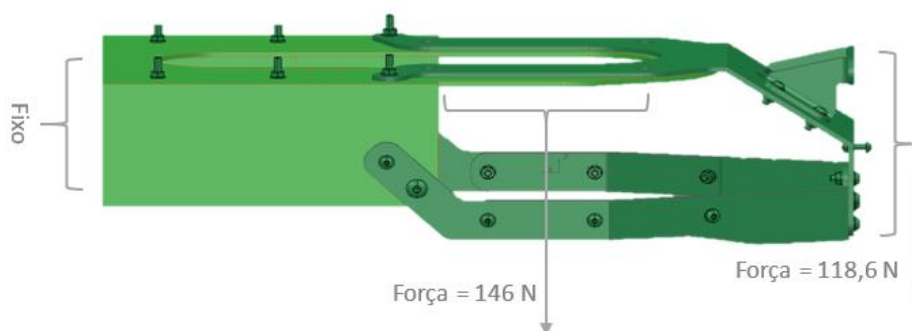


Figura 13 - Representação de zona da peça fixa e zonas nas quais atuam forças.

Além das forças verticais de 146 e 118,6 N a que o sistema de suporte está sujeito na zona intermédia e frontal, respetivamente, necessita-se também de sujeitar o componente a simulação de forças G de intensidade 5, consideradas as forças críticas às quais, em situações extremas e imprevisíveis, o componente poderá estar sujeito.

6.2. RE-DESIGN DO SISTEMA DE SUPORTE

De modo a obter a nova geometria otimizada do sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea*, procedeu-se a um *re-design* da solução pré-existente. Este foi pensado e efetuado por três vias distintas, de modo a comparar as soluções fornecidas por cada abordagem. Obtendo-se com esta metodologia modelos diferentes e, a partir dos quais, se selecionou para produção o que mais se enquadra nos objetivos desta dissertação. Uma vez que o componente já se encontra desenvolvido de um modo convencional, torna-se difícil otimizá-lo manualmente pois, além de, por vezes não se conseguir analisar corretamente as forças que nele atuam, é também difícil imaginar novos *designs* quando já se vislumbrou uma solução. Assim sendo, foi necessário o recurso a ferramentas recentes e que dão os primeiros passos na indústria, utilizando-se *softwares* com ferramentas de otimização topológica, neste caso o *Autodesk Fusion 360*.

Posto isto, e de modo a comparar os resultados obtidos em cada iteração, o *re-design* foi efetuado primeiramente de uma forma manual, seguido de uma otimização topológica automática do modelo pré-existente e, por fim, uma

otimização topológica automática partindo de um bloco com restrições de *design* específicas para a situação em questão.

6.2.1. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA MANUAL

O primeiro passo da concepção do sistema de suporte foi uma abordagem inteiramente manual, na qual se partiu da análise de forma presente no tópico 3.1., identificando os principais esforços e analisando a geometria de modo a proceder à otimização. Com o sistema de suporte já existente presente no *Autodesk PowerSHAPE*, procedeu-se a todo um processo de modelação 3D convencional, cujo principal objetivo visou a diminuição do número de componentes, bem como o volume e, consequentemente, a massa da solução existente.

Na figura 14, encontram-se presentes quatro vistas da solução obtida neste estágio primário do *re-design* do componente.

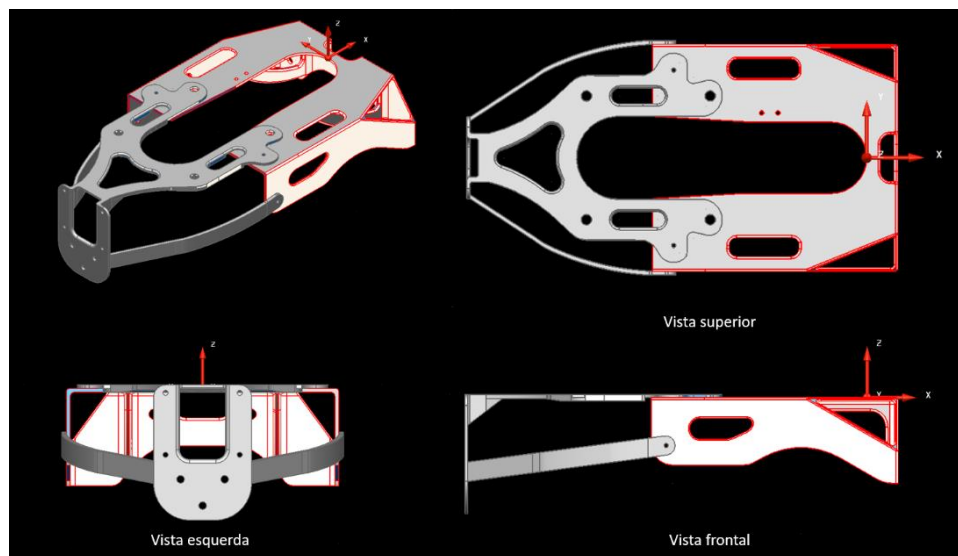


Figura 14 - Quatro vistas representativas do design obtido após otimização manual do sistema de suporte.

A solução obtida e representada na figura anterior, passava por um sistema de suporte constituído por dois componentes (na figura, um com sombreamento a vermelho e outro sem sombreamento), substituindo os nove componentes que constituíam o sistema de suporte existente. Relativamente à massa dos componentes deste resultado, obteve-se um volume de $357,7 \text{ cm}^3$, o que multiplicando pela

densidade do aço inoxidável 316L, aproximadamente 8 g/cm^3 , dá uma massa de 2,9 kg, representando uma diminuição de 38 % em relação ao peso teórico da solução existente, fabricada em aço 316 L (4,7 kg). Contudo, facilmente se percebeu que ao utilizar esta metodologia para otimização topológica se incorreria num processo bastante moroso e de dificuldade extrema, pois teriam de se efetuar diversas iterações, nas quais seria necessário, gerar um modelo, simular, modelar novamente em função dos resultados da simulação, simular de novo e, consecutivamente, repetir o processo até se encontrar uma solução aceitável.

6.2.2. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA AUTOMÁTICA DO MODELO PRÉ-EXISTENTE

A segunda abordagem ao processo de otimização topológica do sistema de suporte foi realizada com auxílio de ferramentas otimização geométrica recentemente adicionadas a alguns softwares de modelação, neste caso o *software CAD/CAM/CAE Autodesk Fusion 360*.

Uma vez que esta ferramenta não permite a simulação e consequente otimização topológica de montagens, previamente e com recurso ao *Autodesk PowerSHAPE*, realizaram-se pequenas alterações nos nove diferentes componentes, de modo a tornar possível a sua união num único sólido, capaz de ser sujeito a simulação sem que ocorressem erros durante a criação da malha. Na figura 15, está presente uma imagem do sistema de suporte constituído por apenas um sólido. A geometria foi propositadamente mantida o mais próximo possível da original, de modo a testar as potencialidades da ferramenta de otimização partindo de um modelo já desenvolvido e com uma forma específica.

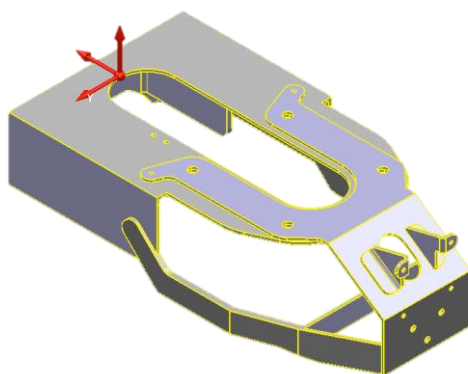


Figura 15 - Sistema de suporte manipulado de forma a constituir um único sólido.

A geometria presente na figura anterior foi importada no *Fusion 360* onde, no modo simulação se escolheu, de entre os diferentes tipos de simulações possíveis, a otimização topológica. De seguida, introduziram-se os parâmetros necessário para que esta fosse executada da maneira mais similar possível com a realidade. O primeiro passo foi definir o material em estudo, neste caso introduziram-se na biblioteca de materiais as propriedades do aço inoxidável 316 L, fornecidas pela LPW, empresa provedora de pós para fabricação aditiva do CEiiA, utilizando-se assim uma tensão de cedência de 530 MPa, uma tensão de rotura de 640 MPa e um módulo de Young de 467,5 GPa.

Após definido o material, introduziram-se as cargas críticas nas zonas intermédia e frontal, definidas no tópico 6.1.. Neste caso, analisando a ficha técnica fornecida pelo CEiiA, as forças críticas, definidas já com alguma margem de segurança, correspondem a forças de ordem de grandeza 5 vezes superior às forças em serviço representadas na figura 13 (forças G de intensidade 5). De seguida, definiram-se as superfícies do sistema de suporte que se encontrariam fixas, alocando-se desta forma constrangimentos aos quatro furos presentes na zona traseira, identificados por circunferências a vermelho na imagem da direita da figura 11. Definiram-se ainda raios de material a preservar, na zona envolvente aos furos, sendo eles 10 mm para os 4 furos na zona traseira, 10 mm para os 4 furos na zona intermédia e 7 mm nos 7 furos presentes na zona frontal do sistema de suporte. Sendo a peça em estudo simétrica, criou-se um plano de simetria, de modo a que os resultados da simulação também eles se apresentassem simétricos. Relativamente ao malhamento, atribuiu-se o menor tamanho possível à malha, ativando-se a opção que permite um malhamento adaptativo às diferentes zonas do modelo. Previamente à simulação estabeleceu-se ainda uma redução de massa objetivo de 50 %, valor este que não é fixo ou preciso e se pode variar posteriormente à simulação. Por fim, executou-se a simulação em *cloud* podendo-se, na imagem da figura 16, encontrar o resultado desta simulação.

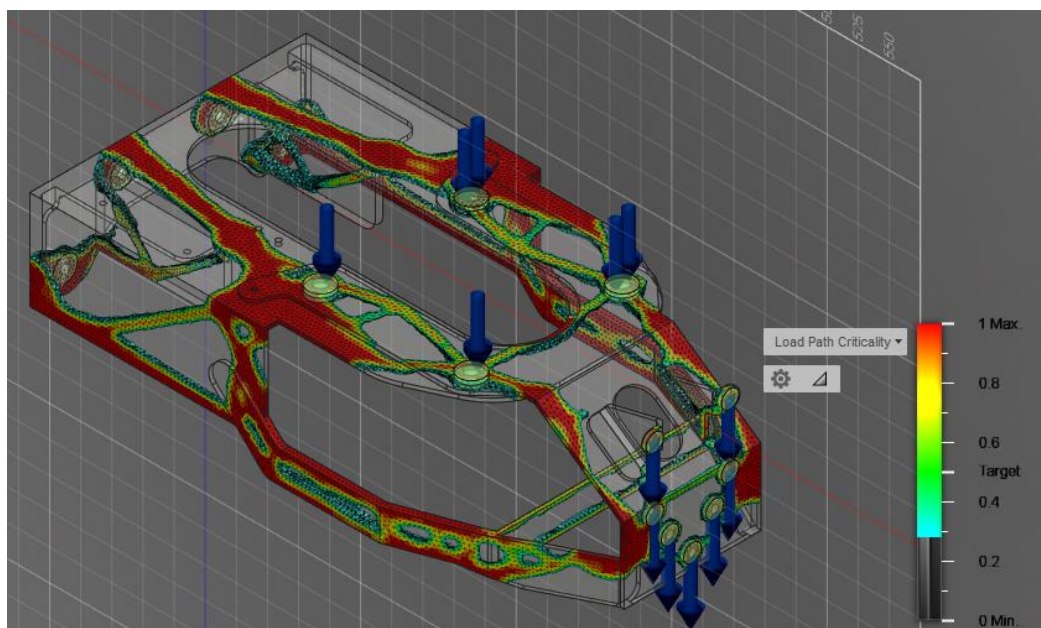


Figura 16 - Resultado da simulação de otimização topológica realizada recorrendo ao software Autodesk Fusion 360, utilizando o modelo pré-existente como referência.

Como se pode visualizar na imagem anterior, a massa foi ligeiramente variada em relação à massa objetivo definida, de modo a fornecer maior segurança, atribuindo mais material. Após aceite o resultado, recorrendo ao comando “*promote*”, transferiu-se a malha resultante para a interface principal do *Fusion 360*, tornando possível exportar o resultado em formato “.stl”.

. No anexo 9 encontra-se, como comparação, uma imagem do resultado obtido para esta mesma abordagem recorrendo a um *software* em *cloud*, denominado *Generate*. Este *software* é gratuito, no sentido em que permite testar e gerar modelos, contudo se o utilizador tencionar fazer *download* do modelo necessita pagar a subscrição exigida pela *Frustum*, empresa detentora do *software*.

Importa referir que este processo não foi de iteração única, sendo este resultado a última iteração de um processo que, apesar da curva de aprendizagem ser elevada, se revelou ligeiramente moroso, pois o trabalho com uma geometria fornecia e não criada de raiz, bem como a transformação dos nove componentes numa única peça trouxe alguns erros associados, inviabilizando várias vezes a simulação durante a criação da malha. Tais erros foram corrigidos recorrendo ao *Autodesk PowerShape*, conseguindo-se dessa forma realizar a simulação e obter o resultado demonstrado anteriormente.

6.2.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA AUTOMÁTICA PARTINDO DE UM BLOCO

Como terceira abordagem ao processo de otimização topológica decidiu-se utilizar a ferramenta de simulação do *Autodesk Fusion 360* utilizada no tópico anterior, contudo, partindo-se de um bloco e não da geometria pré-existente, relativa ao sistema de suporte.

Como referido anteriormente, aquando da realização desta dissertação de mestrado, não foi possível o acesso a *softwares* de *design* generativo. Assim sendo, e na tentativa de aproximação do *design* generativo, optou-se por criar um bloco com as dimensões do componente em estudo, de modo a que o estudo de otimização pudesse obter resultados que espacialmente não tivessem limitados pela geometria do sistema de suporte previamente existente. Com a criação do bloco, a ideia passava pela disponibilização de mais material para que a ferramenta de otimização topológica buscasse uma geometria distinta, pois essa só busca soluções em material existente, contrariamente ao *design* generativo que é capaz de analisar todas as soluções possíveis no espaço, ou seja, em espaços vazios de material.

A modelação deste bloco necessitou ter em atenção alguns requisitos geométricos necessários ao correto desempenho das funções para as quais o sistema de suporte foi construído. Na figura 17, encontra-se uma imagem em arames do bloco desenvolvido.

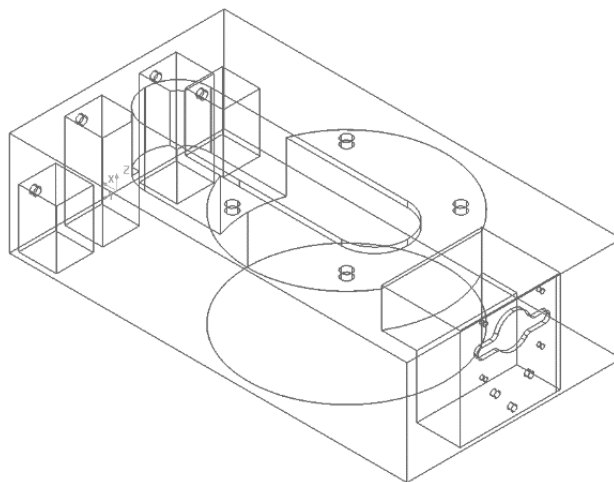


Figura 17 - Bloco desenvolvido para simulação de otimização topológica.

Assim sendo, analisando os constrangimentos geométricos criou-se no bloco, tal como se pode observar na imagem da figura anterior, zonas de acesso a parafusos,

zonas de passagem de cabos ou outros equipamentos e um furo cilíndrico não passante na zona central, de modo a esta zona poder continuar a acoplar o componente central, representado a vermelho na figura 10.

Após concluída a modelação do bloco, o processo seguido foi exatamente igual ao efetuado no tópico anterior desta dissertação. Carregou-se o ficheiro CAD no *Autodesk Fusion 360*, a partir do qual em modo simulação de otimização topológica, se aplicou os mesmos paramentos, de modo a criar resultados válidos para uma comparação posterior. Importa referir que, este bloco em aço inoxidável 316L apresenta uma massa aproximada de 42,4 kg, calculada através do volume do bloco. Facilmente se conclui que esta abordagem, para apresentar uma solução competitiva com o sistema atual de 4,7 kg, necessita de reduções de massa maiores do que 90 %.

Na imagem da figura que se segue, encontra-se o resultado da simulação efetuada no *software Fusion 360*. No anexo 10, pode-se ainda encontrar, a título comparativo, tal como para a abordagem anterior, uma imagem do resultado obtido recorrendo a um *software* em *cloud* denominado *Generate*.

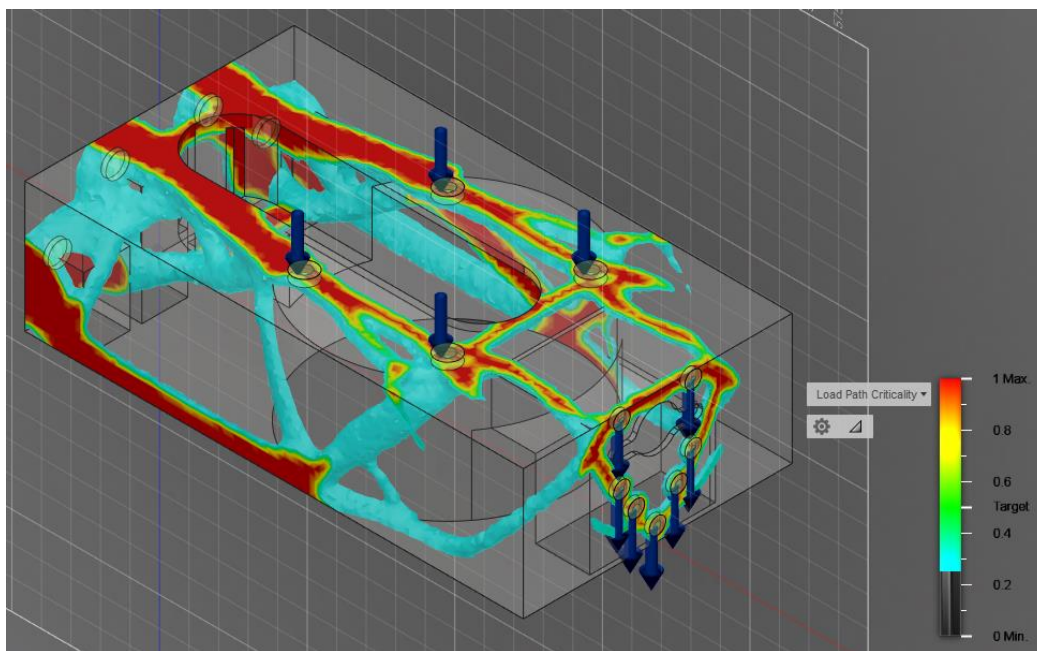


Figura 18 - Resultado da simulação de otimização topológica realizada recorrendo ao software Autodesk Fusion 360, utilizando um bloco como referência.

Analisando a figura 18, pode-se visualizar que também neste caso se aumentou ligeiramente a massa em relação à massa objetivo, de modo a, tal como na

abordagem anterior, garantir maior segurança. Posteriormente, promoveu-se a malha gerada, criando-se um ficheiro com o resultado em formato “.stl”.

6.2.4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS GEOMETRIAS OBTIDAS

Após realizadas as três abordagens ao problema de otimização topológica do sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea* necessitou de se efetuar uma análise comparativa entre as geometrias originadas, de modo a compreender e selecionar qual se adequa melhor aos objetivos finais desta dissertação.

Assim sendo, na figura 19, encontram-se três imagens retiradas a partir do *software* de modelação *Autodesk PowerShape* relativas às soluções obtidas para cada uma das abordagens realizadas.

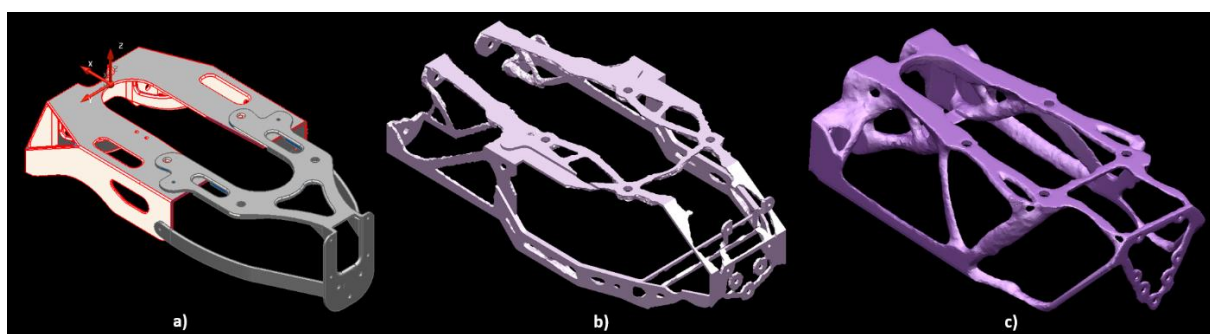


Figura 19 - Soluções obtidas em cada uma das três abordagens distintas; a) Otimização manual; b) Otimização automática partindo do modelo pré-existente; c) Otimização automática partindo de um bloco com restrições de design.

Na figura anterior encontram-se representados os modelos obtidos no final de cada abordagem, de notar que estão representadas as soluções obtidas não manipuladas. Desta forma, na imagem a) encontra-se uma geometria em sólidos, enquanto na imagem b) e c) se encontra uma geometria representada por uma malha de triângulos, originada durante a simulação no *Autodesk Fusion 360*.

Relativamente às geometrias representadas na figura anterior, a tabela que se segue efetua uma comparação entre o número de componentes necessários para a realização do sistema de suporte, o seu peso aproximado quando fabricado em aço inoxidável 316L e a redução do peso, em percentagem, relativamente ao sistema de suporte atual do *AUV Medusa Deep Sea*.

Tabela 1 - Análise comparativa entre sistema de suporte atual e três abordagens de otimização topológica abordadas.

	Sistema de suporte atual	Otimização manual	Otimização a partir do modelo atual	Otimização a partir de bloco
Nº de peças	9	2	1	1
Peso total (kg)	4,7	2,7	2	4,7
Redução do peso (%)		≈ 42	≈ 57	0

Através da leitura da tabela 1 e analisando primeiramente a redução de número de componentes utilizados no fabrico do sistema de suporte, percebe-se que do sistema de suporte atual se passa para três soluções com uma redução bastante significativa no número de peças. A otimização manual originou uma solução com dois componentes e as duas abordagens com recurso a um *software* de otimização topológica criaram uma solução de apenas um componente. Sendo um objetivo primário a redução de número de componentes, entre as três geometrias geradas selecionam-se, como mais adequadas, as duas geradas automaticamente. Sendo também objetivo desta dissertação a obtenção da menor massa possível, calculou-se o peso em quilogramas das geometrias geradas. Assim, analisando a tabela anterior, verifica-se que a maior redução de peso, relativamente ao componente original, ocorreu no modelo gerado a partir do modelo pré-existente com recurso a um *software* de otimização topológica. Este resultado vem de encontro ao esperado pois, durante a conceção da solução existente, o peso foi certamente um dos constrangimentos levados em conta e, o facto de se utilizar sobre esta solução uma ferramenta de otimização topológica que, dentro de uma geometria busca unicamente a massa necessária para sustentar determinadas cargas, trata-se de melhorar uma solução por si só já “otimizada”, obtendo-se assim o melhor resultado.

Assim sendo, atentando na tabela 1 e cruzando os dados do número de peças e a percentagem de redução de peso, facilmente se apreende que das soluções geradas durante a otimização topológica do sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea*, a melhor solução tendo em conta os objetivos pré-estabelecidos, é a geometria gerada automaticamente com recurso ao *Autodesk Fusion 360* partindo da geometria pré-existente.

6.2.5. PREPARAÇÃO DO MODELO OBTIDO PARA PRODUÇÃO

Após escolha do modelo gerado automaticamente a partir do sistema de suporte atual como o mais adequado aos objetivos propostos, foi necessário proceder a novas manipulações em CAD, uma vez que o ficheiro originado após simulação era uma malha com bastantes imperfeições e, portanto, inadequada para produção, tanto a nível funcional como estético.

Neste ponto do processo existiam, pelo menos, três alternativas distintas para originar um modelo CAD adequado a produção, sendo elas as seguintes:

1. Manipular a malha original;
2. Gerar superfícies ajustadas à malha e modelar sobre essas superfícies;
3. Modelar em sólidos, sobrepondo a malha gerada ao sólido que esteve na sua origem, aplicando neste sólido operações booleanas, tendo em conta a geometria da malha;

Das três alternativas enumeradas anteriormente, qualquer uma poderia ser a escolhida como adequada, contudo escolheu-se a terceira executando-se todo o trabalho de modelação em sólidos, uma vez que os conhecimentos possuídos em modelação de sólidos eram superiores aos restantes, considerando-se desta forma que esta alternativa incorreria em menor tempo despendido nesta etapa de preparação do modelo.

Desta forma, abriu-se no *Autodesk PowerShape* o modelo CAD utilizado no *Autodesk Fusion 360* para gerar a otimização topológica, presente na figura 15. Neste mesmo projeto *PowerShape*, tendo em atenção o plano de trabalho ativo, importou-se a malha gerada após simulação de otimização topológica, presente na imagem b) da figura 19, de modo a garantir que a malha ficaria exatamente sobreposta à geometria originalmente importada. Na imagem da figura 20, encontra-se representado o sistema de suporte recebido e corrigido de modo a formar um único sólido, possuindo em si sobreposto o modelo, em malha de triângulos, gerado automaticamente após todo o processo de otimização topológica.

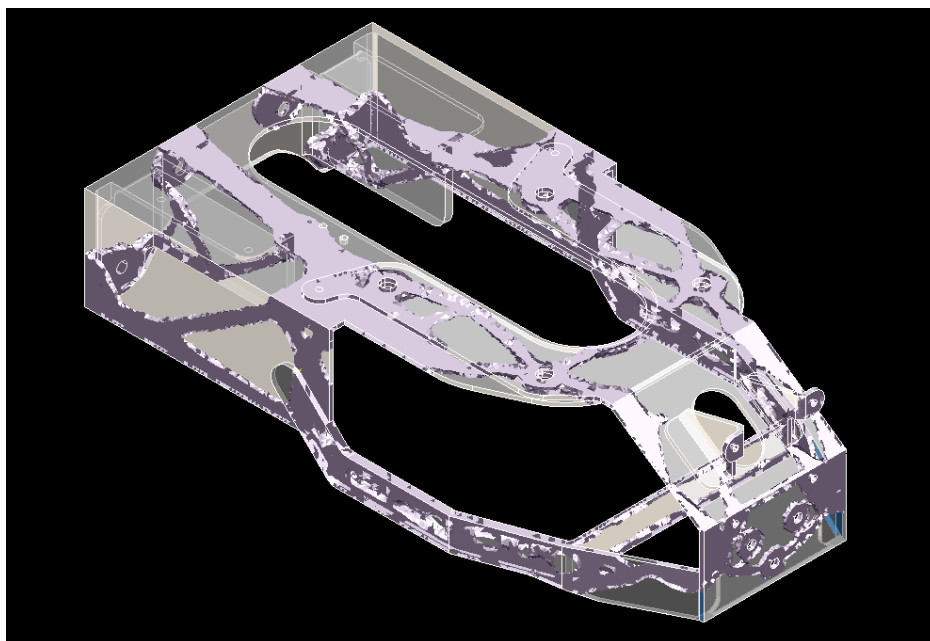


Figura 20 - Sistema de suporte recebido transformado em um único sólido, possuindo em si sobreposto o modelo, em malha de triângulos, gerado automaticamente após a simulação de otimização topológica.

Após obtenção da correta sobreposição dos dois modelos, tal como se pode observar na figura anterior e, uma vez que o modelo possui um plano de simetria, procedeu-se a um corte ao longo desse plano de simetria, permitindo a modelação de apenas metade do modelo conseguindo, desta forma, a redução do tempo associado a esta etapa de modelação. De seguida, iniciou-se um processo de obtenção de arames limitadores da malha, ou seja, linhas que, de certa forma fossem como arestas limitadoras ou curvas de contorno da geometria, tal como se pode observar a verde e amarelo, no exemplo da figura que se segue.

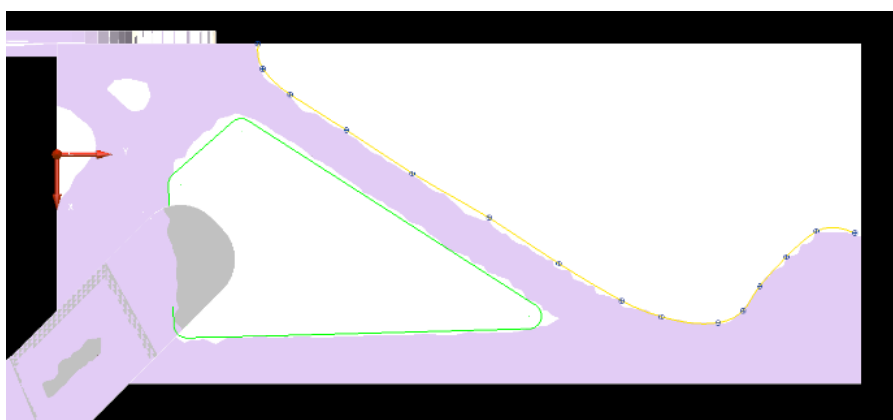


Figura 21 - Exemplo da criação e utilização de arames para a realização de operações booleanas no sólido representativo do sistema de suporte atual unificado.

Assim, possuindo todos os arames, criaram-se curvas compostas a partir das quais foi possível aplicar operações de corte no sólido primário, obtendo-se uma geometria como a representada na imagem da figura 22.

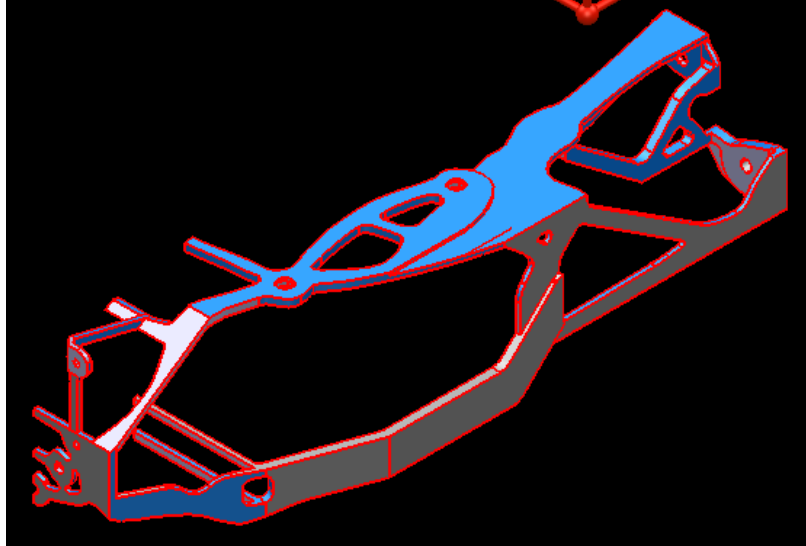


Figura 22 - Geometria CAD obtida após primeiras operações booleanas.

Após obtida a geometria representada na figura anterior e de modo a garantir que se avançava na modelação sem acumular falhas que, posteriormente poderiam incorrer em problemas inviabilizadores de posterior simulação ou produção, correu-se uma análise do sólido através da ferramenta do *PowerShape*, reparador de sólidos. Assim, corrigiram-se erros até então gerados, como por exemplo *gaps*.

Após esta análise, e devido ao corte anteriormente feito através do plano de simetria, procedeu-se a um espelhamento da geometria representada na figura 22, obtendo-se um uma geometria já próxima da geometria final. A esta geometria quase final efetuaram-se ligeiras alterações tendo em conta aspetos estéticos, bem como aspetos de produção e desempenho, entre os quais se pode indicar, por exemplo, uma redução no diâmetro dos furos, de modo a torná-los furos-guia, para efetuar furação mais precisa em etapa de pós-processamento. Com estas alterações chegou-se a uma geometria final, representada na imagem da figura 23, pronta para prosseguir para a próxima etapa do processo de desenvolvimento do produto (figura 8), a simulação e validação das propriedades mecânicas.

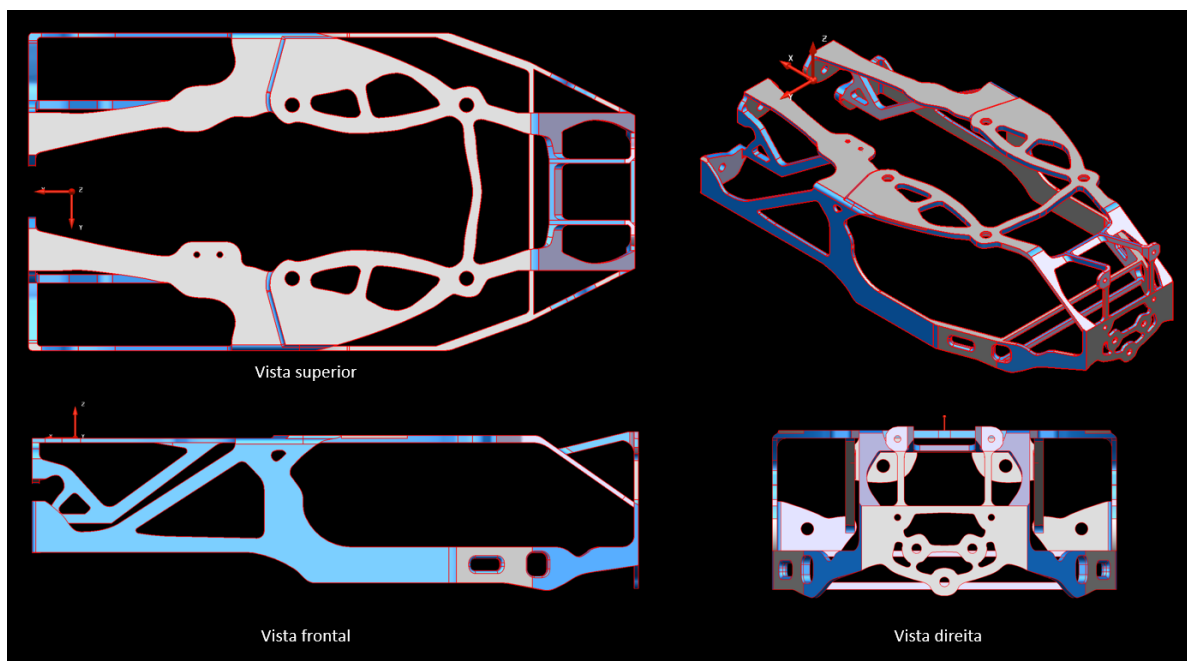


Figura 23 - Quatro vistas representativas da geometria final, obtida após preparação do modelo para produção.

Analisando a figura anterior, percebe-se que não se introduziu na geometria final estruturas em rede, como as apresentadas na figura 2. Apesar de este ser um problema de otimização topológica que, entre outras coisas busca a diminuição da massa, considerou-se que para o modelo em causa não seria adequado introduzir uma das grandes vantagens trazidas pela liberdade de *design* oferecida pela impressão 3D, a criação de estruturas em rede. A introdução destas estruturas com recurso ao *Autodesk Netfabb* não foi considerada pois, o componente desenvolvido, não possuía zonas maciças justificativas, antes pelo contrário, este apresenta em todo o seu volume uma geometria composta por paredes pouco espessas e zonas pouco maciças (espessura máxima 5 mm).

Por fim, a título comparativo, na imagem da figura 24, encontra-se lado a lado a geometria em malha de triângulos obtida após a simulação de otimização topológica e o modelo final, a partir desta desenvolvido.

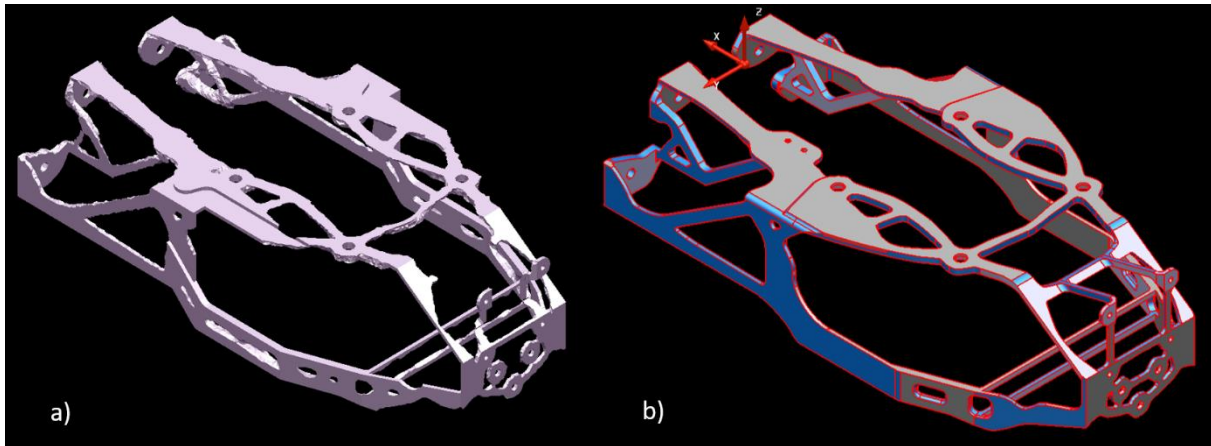


Figura 24 - comparação entre a) Geometria em malha de triângulos, obtida após otimização topológica e b) modelo final.

Analisando as imagens da figura 24, é possível verificar que o modelo final se mantém fiel à geometria originada pelo *software* de otimização topológica, sendo ambas bastante similares e respeitando, o modelo final e as exigências funcionais e visuais, tal como era objetivo.

6.3. VALIDAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO MODELO OBTIDO

Após obtenção de uma geometria final e, antes de passar a uma etapa de fabrico, é necessário preceder a um período de simulações capazes de validar a geometria obtida, ou seja, é imperativo simular a sujeição do componente a um conjunto de cargas críticas que este pode sofrer quando se encontrar em serviço, de modo a verificar que não ocorrem falhas aquando da sua utilização, tais como fratura ou mesmo deformação plástica permanente.

Assim sendo, como o *software* de otimização topológica utilizado possui modos de análise por elementos finitos e a curva de aprendizagem é elevada, recorreu-se uma vez mais ao *Autodesk Fusion 360* para, desta feita, executar uma análise capaz de validar a geometria previamente obtida.

6.3.1. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO

Primeiramente, importou-se para a área de trabalho do *Fusion 360* o modelo final, presente na figura 23, definindo-se de seguida qual o material que constituía o componente. Para este feito utilizou-se o mesmo material, ou seja, as mesmas

propriedades mecânicas empregues aquando da definição do material para simulação de otimização topológica, enumeradas anteriormente. Assim, foi definido como material o aço inoxidável 316L.

Após definição do material, aplicaram-se à peça os constrangimentos e as forças a atuar. Novamente de um modo análogo ao utilizado na simulação para otimização topológica, utilizaram-se as forças críticas definidas pela folha técnica fornecida pelo CEiiA e presente no anexo 8, ou seja, cinco vezes a massa dos componentes ao sistema de suporte acoplados. Na figura 25, pode-se visualizar o sistema de suporte com as cargas e constrangimentos representados e legendados.

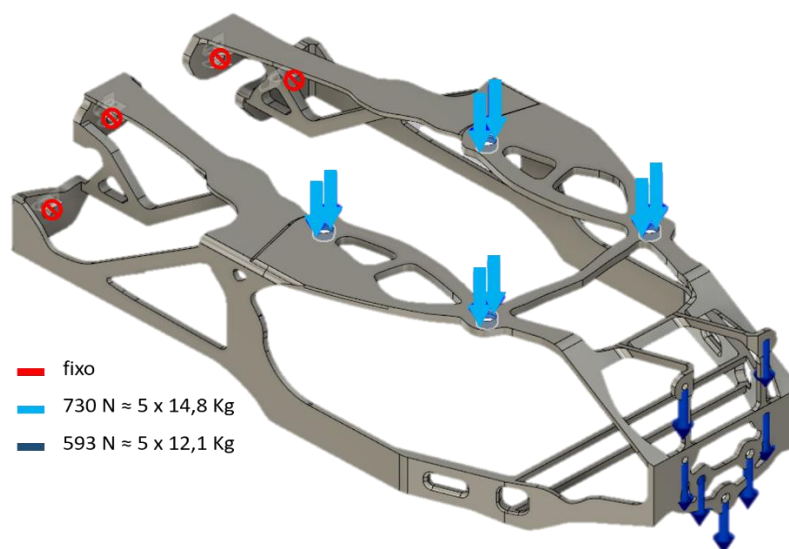


Figura 25 - Sistema de suporte com cargas e constrangimentos utilizados na simulação por elementos finitos.

Pela leitura da figura anterior, percebe-se que na zona traseira do sistema de suporte, a vermelho, nos quatro furos foram definidos constrangimentos, indicando que os furos seriam fixos. Na zona intermédia definiu-se uma carga vertical de 730 N, representada pelas setas a azul claro e, na zona frontal, representado por sete setas a azul escuro, definiu-se uma carga vertical de 593 N, tal como se pode ler na legenda da figura.

Antes de dar início ao cálculo, indicou-se ainda as condições de malhamento, essas são responsáveis por garantir uma maior ou menor qualidade na simulação efetuada. Sendo a qualidade da simulação um parâmetro importante, deu-se primazia ao malhamento, desta forma, além de se selecionar uma malha adaptativa

às zonas da peça optou-se por um refinamento adaptativo da malha elevado, de acordo com o que se pode visualizar na figura 26.

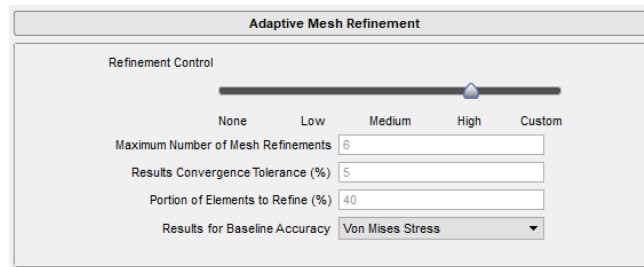


Figura 26 - Condições de refinamento adaptativo da malha empregues na simulação FEA utilizada.

6.3.2. RESULTADOS DA FEA

Finalmente, após definidas todas as condições da simulação iniciou-se o cálculo, obtendo-se resultados em termos de tensão, deslocamento, deformação e fator de segurança. Resultados esses que serão seguidamente analisados.

6.3.2.1. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO COMPONENTE

Na figura 27, encontra-se uma imagem dos resultados obtidos em termos de tensões, em MPa, sofridas ao longo de toda a geometria da peça.

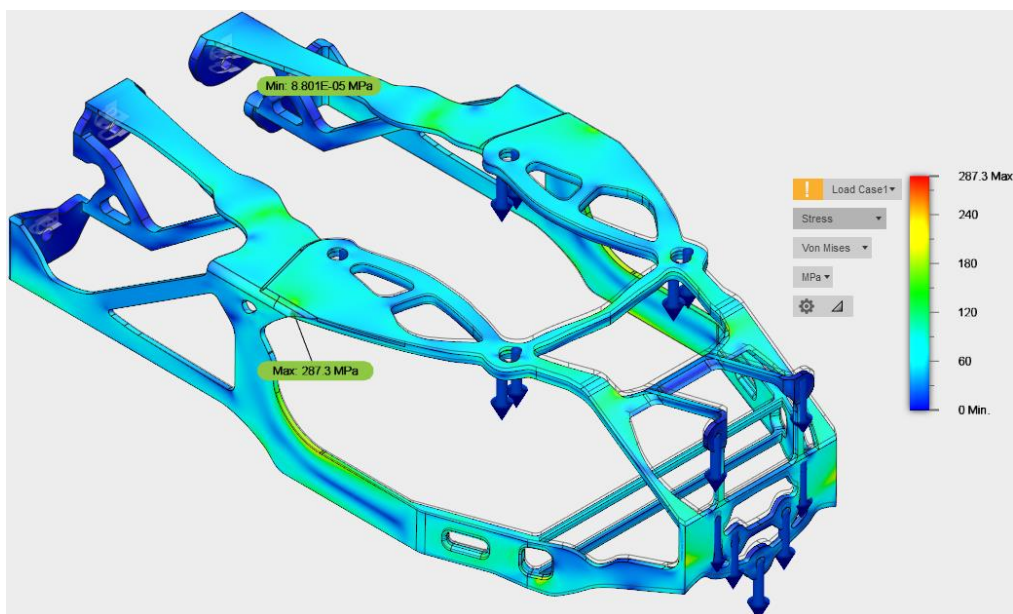


Figura 27 – Resultados obtidos após FEA, expressos em distribuição de tensões no componente.

Segundo a empresa de pós metálicos para fabricação aditiva LPW, fornecedora do CEiiA, o aço inoxidável 316L produzido com os seus pós tem em média uma tensão de cedência de 530 MPa e uma tensão de rotura de 640 MPa. Analisando a imagem relativa à distribuição de tensões no componente num caso crítico, visualiza-se que no máximo este atingirá uma tensão de aproximadamente 287 MPa, sendo esta muito localizada e bastante acima da média do restante componente. Ainda assim, tanto a média de tensões atingidas no componente, como a tensão máxima, se encontram bastante abaixo da tensão de cedência indicada pelo fornecedor deste aço inoxidável permitindo, desde já, concluir através desta análise que, as tensões a que o componente poderá vir a estar sujeito não provocarão deformação plástica ou fratura do material. Analisando o restante volume do sistema de suporte desenvolvido visualiza-se que, em média, a tensão à qual o componente estará sujeito se encontra entre os 50 e os 120 MPa, existindo algumas zonas em que este valor cresce. Contudo, os valores verificados são sempre bastante abaixo dos 530 MPa, tensão a partir da qual o fornecedor da matéria prima indica que se entra no regime plástico do material.

6.3.2.2. DESLOCAMENTO RELATIVAMENTE À GEOMETRIA ORIGINAL

De seguida e uma vez analisados os resultados em termos de distribuição de tensões, importa conhecer os resultados em termos de deslocamento momentâneo do sistema de suporte em relação à posição original. Como é sabido, os materiais apresentam domínio elástico e plástico e, embora pelos resultados anteriores não se perspetive a existência de deformação plástica, é bastante provável a existência de, nestes casos de cargas extremas, uma ligeira deformação elástica do material, recuperável após a retirada das cargas. Assim, na figura 28 encontram-se os resultados da simulação, no que diz respeito ao deslocamento momentâneo sofrido pelo componente aquando da aplicação destas condições extremas.

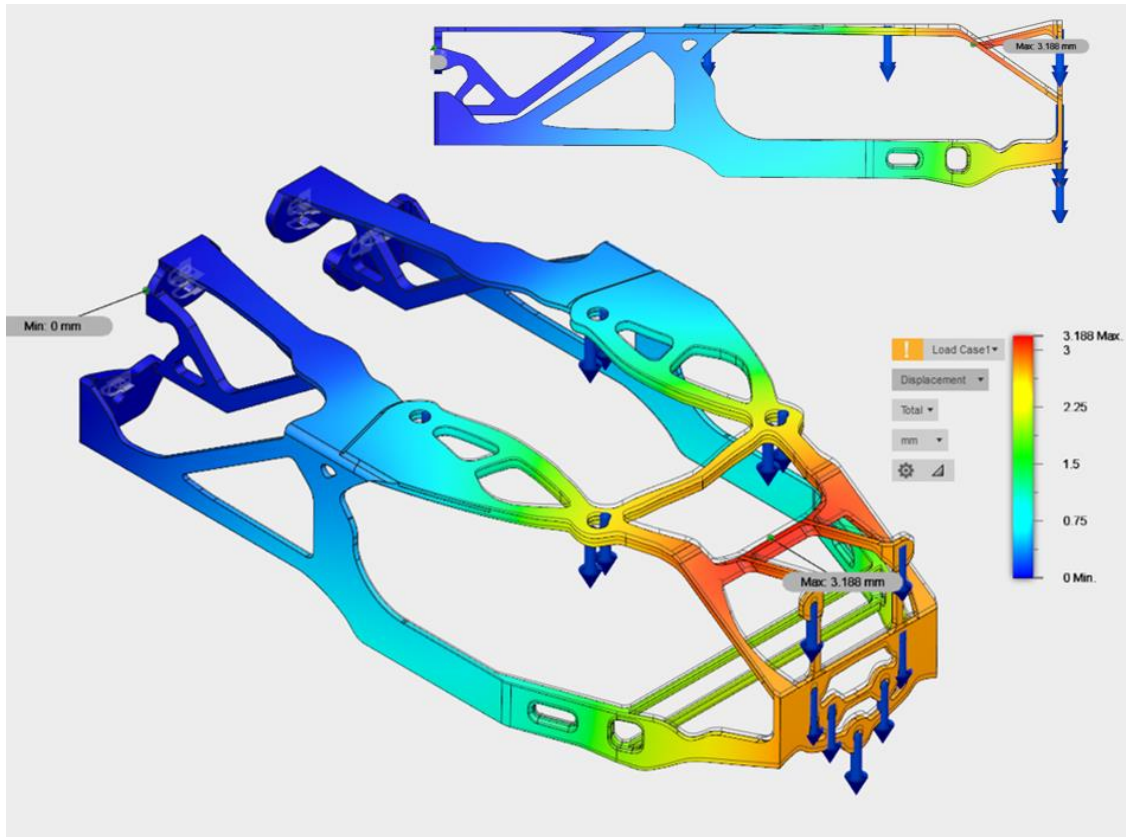


Figura 28 - Resultados obtidos após FEA, expressos em deslocamento do componente, relativamente à posição original.

Analisando a imagem da figura anterior, percebe-se que em caso de sujeição do componente às condições extremas de 5 G's de força, este poderá sofrer um deslocamento no máximo de aproximadamente 3,2 mm, relativamente à sua posição inicial. Este deslocamento, verificar-se-á, tal como seria de esperar, na zona frontal do sistema de suporte, local que se encontra mais longe da zona fixa deste e onde, se encontram as cargas. À medida que se avança para a zona traseira do sistema de suporte (zona fixa) o deslocamento vai sendo cada vez menor, até se atingir o valor 0 na zona traseira do sistema de suporte.

6.3.2.3. DEFORMAÇÃO PERMANENTE RELATIVA À GEOMETRIA ORIGINAL

Após a verificação de que em casos extremos existirá uma ligeira movimentação/deslocamento do componente relativamente à posição inicial e percepção de que as tensões atingidas não chegam próximas do regime plástico, conclui-se, que este deslocamento é totalmente recuperável após a remoção das

cargas. Contudo, torna-se necessário verificar quais os resultados que a simulação fornece relativamente à deformação permanente sofrida pelo componente após sujeição a estas cargas, perspetivando-se, após os resultados anteriores, valores praticamente nulos.

Assim sendo, na figura 29 encontram-se representados os resultados expressos na forma de deformação permanente do componente.

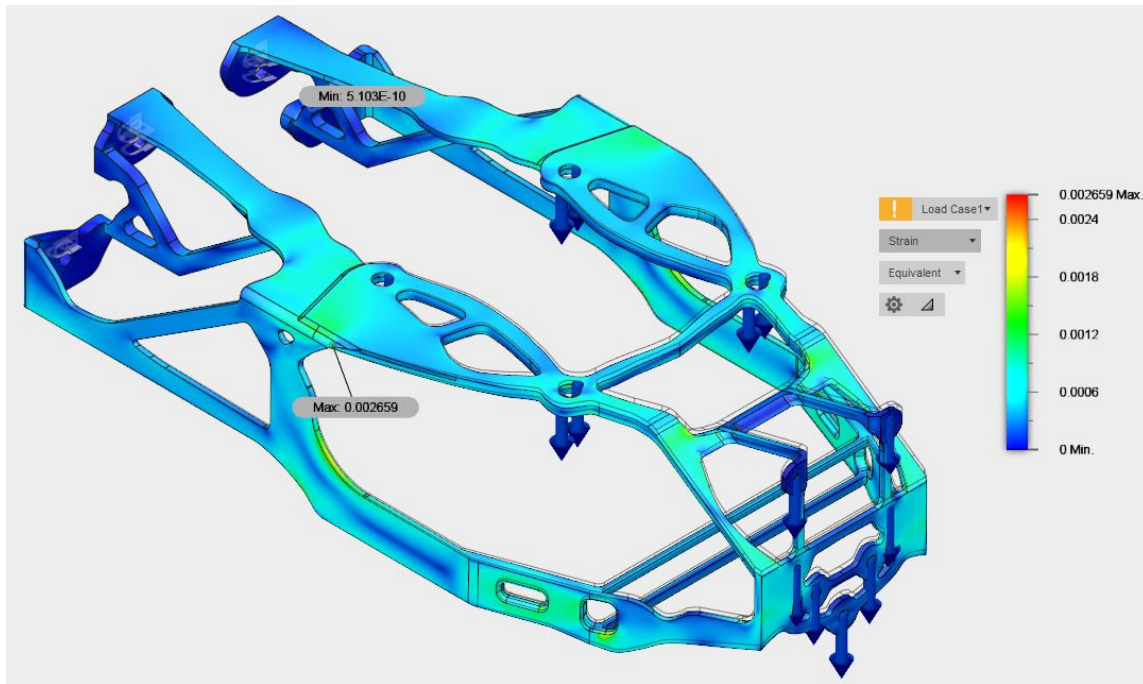


Figura 29 - Resultados obtidos após FEA, expressos em deformação permanente do componente, em relação à forma inicial.

Através da análise dos resultados da simulação, expressos em termos de deformação permanente relativamente à geometria original, presentes na figura anterior, verifica-se que exatamente na mesma zona onde existe a maior tensão acumulada (figura 27), existe uma deformação equivalente de aproximadamente 3 milésimas, sendo este valor considerado desprezável por ser bastante baixo. Comprova-se, de acordo com o esperado em função dos resultados apresentados anteriormente, que as forças críticas que poderão atuar no sistema de suporte, não atingem proporções capazes de entrar no regime plástico do material, não sendo, portanto, capazes de provocar uma deformação definitiva do componente.

6.3.2.4. COEFICIENTE OU FATOR DE SEGURANÇA

Por fim, resta apresentar os resultados em função do coeficiente de segurança, ou seja, quantas vezes o sistema de suporte é mais resistente do que o necessário para sustentar as cargas críticas definida. Normalmente, o fator de segurança é tanto mais elevado quanto maior o risco associado à falha do componente, sendo que, o risco mais elevado que pode advir da falha de um componente é a colocação em risco de vidas. Nestes casos específicos, o coeficiente de segurança usualmente definido é 3, significando isto que o sistema projetado necessita de aguentar pelo menos 3 vezes as cargas críticas aplicadas. Assim, um coeficiente de segurança de 1 é considerado um coeficiente de alto risco, uma vez que o sistema projetado não aguenta mais cargas do que aquelas que lhe serão aplicadas. No caso do sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea*, uma vez que não há vidas em jogo, o sistema de suporte não necessita obrigatoriamente de suportar 3 vezes as forças críticas aplicadas. Contudo, necessita-se de um coeficiente de segurança superior a 1, de modo a garantir que o sistema de suporte aguarde imprevistos sem ultrapassar as cargas limites do regime elástico ou mesmo sem atingir a falha por fratura.

Na figura 30, encontram-se os resultados obtidos na simulação FEA para o coeficiente de segurança.

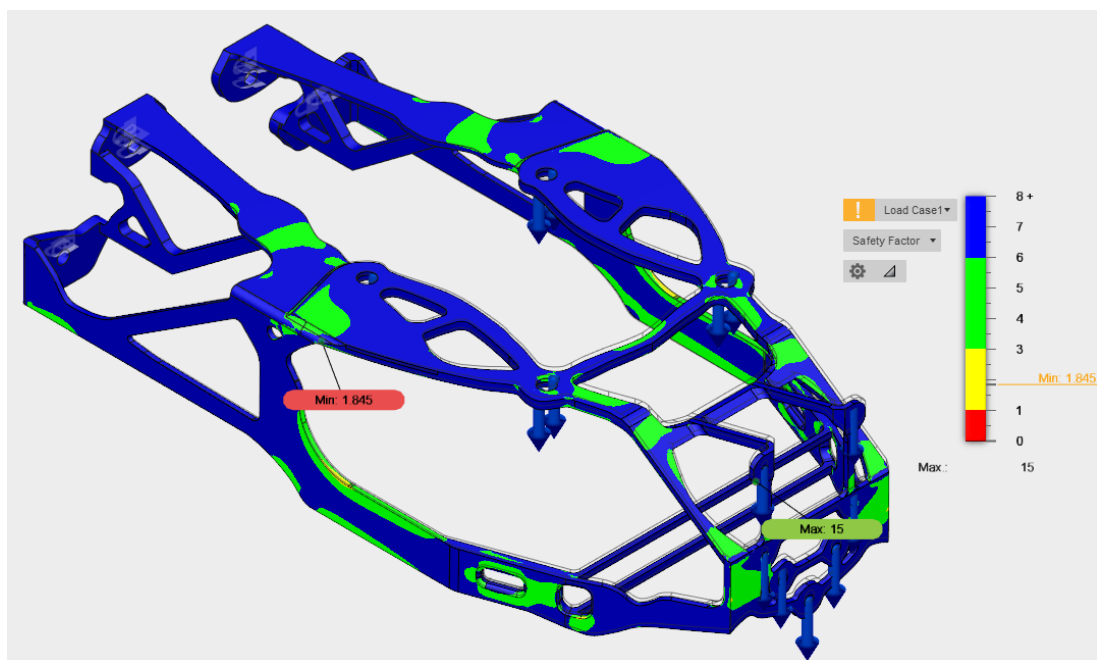


Figura 30 - Resultados obtidos após FEA, atentando no coeficiente de segurança.

Analisando os resultados referentes ao coeficiente de segurança, presentes na figura anterior, percebe-se que a maior parte do volume do componente se encontra com um coeficiente de segurança bastante superior a 3, valor superior ao necessário para este componente, pois a sua falha não implica a perda de vidas. Aliás, pode-se referir que a maior parte do volume do sistema de suporte desenvolvido se encontra com um coeficiente de segurança superior a 6. Contudo, importa mencionar o valor mais baixo obtido, sendo este 1,845 e obtido numa área reduzida, identificada na figura anterior e coincidente com a área na qual se verificaram maiores tensões acumuladas, sendo de prever que, em casos completamente anormais, sendo as forças críticas a atuar 2 vezes superiores aos 5 G's definidos, o componente pode iniciar uma falha naquela região. Apesar do valor mínimo abaixo de 2 em zonas específicas, os resultados obtidos para o fator de segurança são considerados aceitáveis, pois praticamente todo o volume do sistema de suporte se encontra acima do coeficiente 3, e mesmo as zonas abaixo desse valor, possuem um coeficiente que permite aguentar com cargas 1,8 vezes superiores às cargas críticas definidas.

Assim sendo, após verificação de todos os resultados fornecidos na análise por elementos finitos efetuada, conclui-se que o sistema de suporte se encontra validado e, desta forma, pronto para avançar no processo de desenvolvimento do produto, ou seja, avançar para a etapa produção.

6.4. PREPARAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO

Após concluir todas as etapas prévias no fluxograma da figura 8 e, com o componente validado a última etapa do procedimento é o processo de fabrico. Para isso, necessitam-se ter em conta diversos fatores, tais como parâmetros máquina a utilizar, orientação do componente, suportes a utilizar e simulação do processo de fabrico, seguidamente abordados.

6.4.1. PARÂMETROS MÁQUINA

Existem diversos parâmetros máquina a ter em conta antes de se efetuar um componente recorrendo a uma tecnologia baseada em *powder bed fusion*. Uma vez que se trata de uma tecnologia de fabrico recente e, principalmente, porque se trata

de uma máquina protótipo que irá pela primeira vez fabricar um componente com as dimensões deste componente, os parâmetros não se encontram totalmente otimizados, escolhendo-se dessa forma, como parâmetros máquina mais adequados, os recomendados pelo fabricante do equipamento. Como tal, na tabela 2 podem-se encontrar os parâmetros considerados os mais adequados.

Tabela 2 - Parâmetros máquina utilizados.

Adira AM	
Potência do laser (W)	200
Diâmetro do feixe laser (mm)	0,080
Velocidade de avanço (mm/s)	600
Espessura de camada (mm)	0,050
Espaçamento entre passagens (mm)	0,16
Tempo de recobrimento (s)	10
Ângulo de rotação entre camadas (°)	67

6.4.2. ORIENTAÇÃO DO COMPONENTE

Em impressão 3D, a escolha da orientação de um componente na plataforma de construção é mais do que perceber qual é a orientação da peça que necessita de menos suportes. Aliás, adotar esta abordagem ao problema de escolha da orientação pode estar errada, pois há muitos outros fatores a influenciar a orientação de um componente. Dentro desses fatores podem-se destacar, o volume disponível, o empacotamento com outros componentes, a área de contacto entre suporte e peça, o volume de suportes, a altura, o centro de gravidade, área de pó a fundir por camada, entre outros. Além disso, quando se projeta inteiramente um componente para fabricação aditiva, um dos principais fatores a ter em conta na etapa de *design* é a orientação de construção, demonstrando a importância que uma boa orientação pode ter na qualidade final.

De modo a ter em conta o máximo de parâmetros influenciadores da orientação da peça, o *Netfabb* possui uma ferramenta de orientação que fornece automaticamente as várias opções disponíveis. Contudo, neste projeto a altura máxima revelou-se um fator determinante, pois o equipamento de fabrico apenas possibilita a construção de peças com uma altura máxima de 200 mm.

Assim, no *Netfabb* procedeu-se a uma busca pela melhor orientação do componente, sem limitar a altura máxima a 200 mm. Deste modo, encontraram-se dez soluções (presentes no anexo 11), das quais apenas três se encontravam dentro do considerado aceitável para este projeto. Das soluções aceitáveis, optou-se pela que possuía menor volume de suportes, bem como o centro de gravidade mais baixo. Na figura 31, encontra-se representada a solução escolhida como orientação adequada.

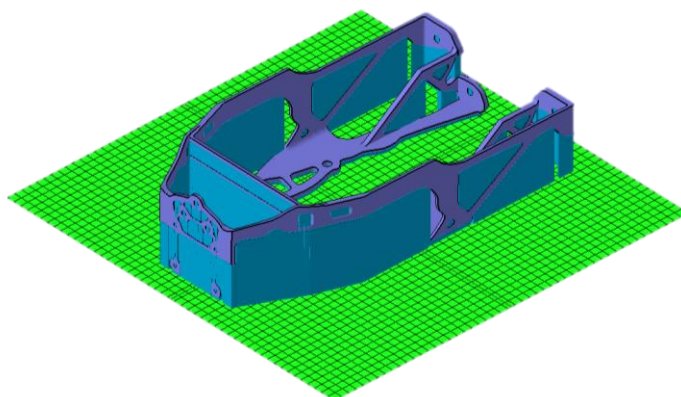


Figura 31 - Orientação escolhida para fabrico do componente.

6.4.3. CRIAÇÃO DE SUPORTES

Após definida a orientação do componente, a etapa que se seguiu foi a criação de suportes. Sendo o suporte da peça igualmente um aspeto fundamental para o correto desenvolvimento de um produto por fabricação aditiva, a máxima atenção foi dada, de modo a que os suportes tivessem duas funções essenciais. Além de suportar a peça, devem possuir resistência suficiente para aguentar algumas tensões originadas durante o processo de fabrico, bem como possuírem uma união com a peça e plataforma de remoção, em pós-processamento, o mais fácil possível.

Assim, recorrendo à ferramenta de criação de suportes no *Netfabb*, procedeu-se à criação dos suportes. Neste *software* existe um *script* exemplo para a criação de suportes em *powder bed fusion*, *script* esse que foi tido como base para a criação

dos suportes. Contudo, procederam-se a ligeiras alterações neste, de modo a atingir as funções definidas para os suportes a construir. Na imagem da figura 32, encontra-se os suportes do tipo “*area with volume support*” utilizados, tendo por base o *script* do *Netfabb*.

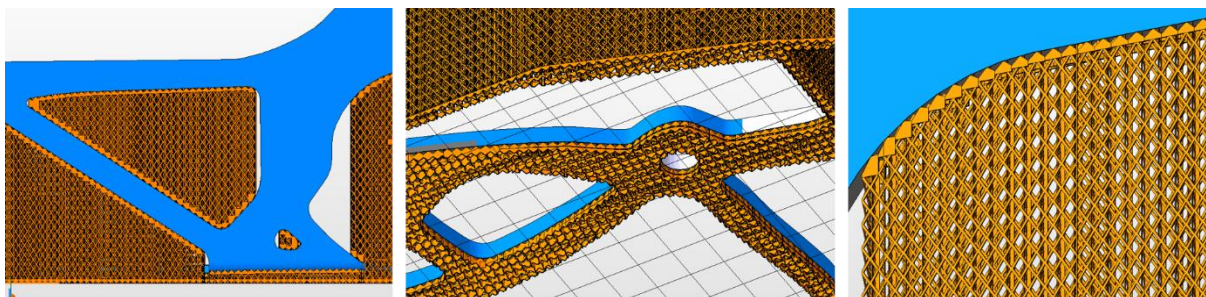


Figura 32 - Suportes do tipo “*area with volume support*” criados com recurso ao Autodesk Netfabb,

A principal alteração ao exemplo fornecido pelo *Netfabb* foi o aumento da espessura de cada suporte, tendo como base o diâmetro do feixe de laser utilizado, de modo a conferir maior resistência, como previamente referido. No anexo 12, encontram-se todos os valores utilizados na criação dos suportes empregues.

Contudo, importa referir que, para obtenção das propriedades dos suportes que mais se adequam aos objetivos definidos é necessária alguma experiência prévia resultante da impressão de vários componentes, o que não se verifica, uma vez por se trata de um equipamento protótipo e tecnologias bastante recentes. No entanto, de modo a diminuir os erros associados às várias iterações que possam ser necessárias para o correto desenvolvimento de um produto por fabricação aditiva, o *Netfabb* fornece a opção de realizar uma simulação do processo de fabrico, algo que se considera importante e aconselhável.

6.4.4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO

Tal como o *design* generativo e as ferramentas de otimização topológica utilizadas, também a simulação de processos de fabrico aditivo metálico é algo inovador e, necessário, para o correto aproveitamento das potencialidades desta tecnologia de fabrico. Assim sendo, e possuindo o *Autodesk Netfabb* esta opção,

procedeu-se à simulação do processo de fabrico de modo a, não só a prever erros, mas também validar esta ferramenta para possível uso futuro no CEiiA.

Importa referir que, a correta execução desta simulação foi de dificuldade elevada pois, sendo uma ferramenta inovadora e em desenvolvimento/melhoramento foi necessária, junto da equipa da *Autodesk*, a resolução de vários erros que foram aparecendo durante o processo.

6.4.4.1. FLUXO DE TRABALHO DA SIMULAÇÃO

Para se realizarem simulações de processos de fabrico, o *Netfabb* possui uma base de dados na qual aglomera diferentes parâmetros máquina e diferentes materiais. No entanto, esta base de dados é restrita, não possuindo nela armazenada informação coincidente com o utilizado nesta dissertação, tanto em termos de parâmetros máquina, como de material. Assim, tornou-se necessária a realização de uma simulação prévia, da qual resultaria um ficheiro “.prm” contendo a informação essencial à simulação do processo de fabrico do componente em estudo. Sinteticamente, nesta simulação prévia são simuladas em pequena escala as condições utilizadas, guardando o ficheiro “.prm” a resposta mecânica do material ao conjunto de parâmetros máquina especificados. Posteriormente, os resultados presentes neste ficheiro são extrapolados para uma peça, recorrendo a uma segunda simulação.

De modo a dar início à simulação prévia originária do ficheiro “.prm”, recorreu-se ao *Netfabb Local Simulation*, no qual se introduziu na base de dados de materiais, as propriedades dos pós de aço inoxidável 316 L, tais como condutividade térmica, densidade, calor específico, coeficiente de expansão térmica, módulo elástico, entre outras. Após criado o material introduziram-se os parâmetros máquina definidos no tópico 6.4.1., dando-se início à simulação. No anexo 13, encontra-se um esquema representativo dos parâmetros necessários para a criação de um ficheiro “.prm”.

Após realizada esta simulação prévia e, já em posse do ficheiro representativo das condições reais de fabrico, no *Netfabb Local Simulation* importou-se a peça a produzir e os suportes, num único ficheiro “.3mf” (único capaz de identificar peça e suportes corretamente), de modo a proceder à simulação final. De seguida,

procedeu-se à configuração do processo físico de simulação, importando-se o ficheiro “.prm” previamente originado, definindo-se as condições da placa de construção e do malhamento utilizado. Ativou-se ainda a opção de previsão de falha das estruturas de suporte após estas atingirem tensões superiores à tensão de rotura do material. Com todas as condições necessárias definidas deu-se início à simulação localmente, uma vez que o tamanho desta era superior ao permitido para simulações em *cloud*.

6.4.4.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Após realizada a simulação do processo de fabrico alcançam-se diversos resultados que carecem de uma análise. Quando esta simulação se encontrar otimizada para um conjunto específico de máquina e material, representando a realidade de o modo mais próximo possível, esses resultados servem para efetuar alterações necessárias à prevenção de erros que, tornam o desenvolvimento de um produto por impressão 3D moroso e pouco rentável. Neste caso os resultados obtidos serviram para testar esta ferramenta inovadora, dar início à otimização da simulação para o conjunto máquina-material utilizados, bem como proceder a alguma alteração considerada desejável.

Como referido anteriormente, a simulação fornece diversos resultados sendo, de seguida, apresentados os resultados que, mesmo conectados aos restantes resultados demonstrados em anexo, se consideraram mais relevantes. Apresenta-se então, o deslocamento do componente durante o fabrico, o tipo de estrutura (identifica falhas nas estruturas de suporte) e a possível interferência entre peça e máquina, durante o fabrico. No anexo 14, encontram-se apresentadas imagens dos restantes resultados obtidos, sendo eles: *principal stress*, *von Mises Stress*, *Elastic Strain*, e *principal stress direction*.

6.4.4.2.1. DESLOCAMENTO

Os resultados em forma de deslocamento demonstram a distância em milímetros que o componente em fabrico se desloca relativamente à geometria original, em determinado instante do processo de fabrico. Este deslocamento efetuado pelo componente em fabrico é devido a expansões e contrações do

material, bem como às tensões acumuladas devido aos gradientes térmicos verificados durante o processo.

Na figura que se segue pode-se verificar os resultados obtidos para esta análise, logo após o fabrico terminar e depois de retirar a peça, tanto da plataforma como dos suportes.

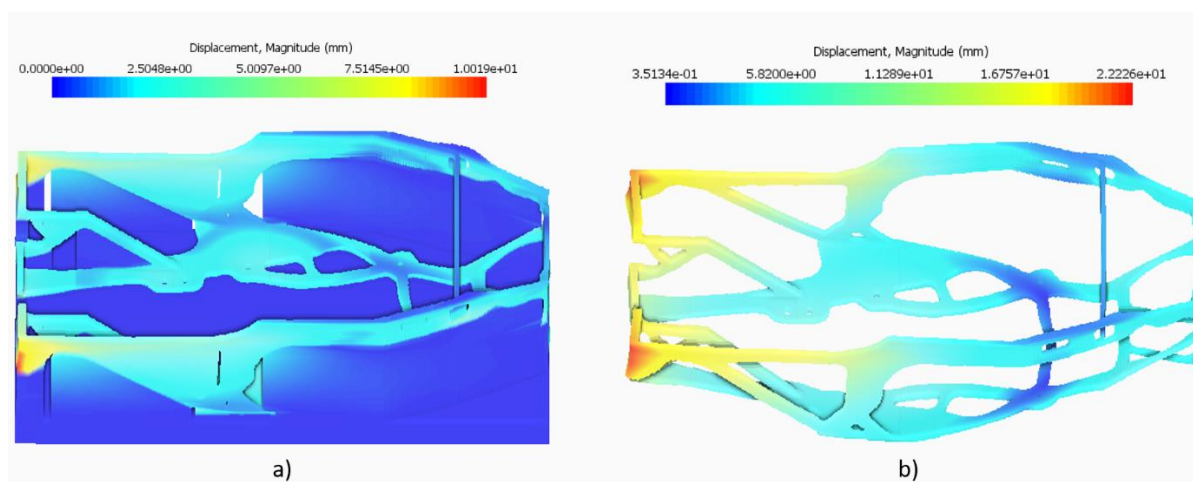


Figura 33 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando no deslocamento do componente em milímetros, relativamente à geometria original; a) Final do fabrico; b) após remoção dos suportes.

Após a análise da figura anterior, facilmente se visualiza que as tensões originadas no componente durante o fabrico são de grande dimensão, uma vez que este apresenta um deslocamento considerável, quando comparado à geometria original, podendo ainda assim algum deste deslocamento ser recuperado plasticamente. Visualiza-se que, antes da remoção da plataforma e suportes, o máximo de deslocamento é aproximadamente 10 mm, na zona traseira do sistema de suporte, mesma zona, na qual após remoção de suportes se verifica o maior deslocamento, aproximadamente 22 mm, sendo de perspetivar, uma possível falha das estruturas de suporte naquela zona.

Como referido anteriormente, na origem deste deslocamento estarão as tensões residuais acumuladas durante o fabrico, como se pode verificar nos resultados demonstrados anexo 14 a) e b). As maiores tensões e o maior deslocamento, verifica-se na zona mais maciça da peça, tal como esperado, uma vez que o gradiente térmico originado será maior. Apesar do componente apresentar paredes relativamente finas (3 a 5 mm), as tensões altas originadas podem ser explicadas por diferentes motivos, tais como a dimensão do componente, o estilo de

varredura do laser e a orientação do componente que, como referido anteriormente era uma limitação, devido à altura do componente e à altura disponível para fabrico.

Pode-se ainda, pela análise dos resultados após remoção da plataforma e suportes, prever a necessidade de realização de um tratamento térmico de alívio de tensões antes de qualquer etapa de remoção, quer de plataforma, quer de suportes.

6.4.4.2.2. FALHA DAS ESTRUTURAS DE SUPORTES

Outro dos resultados que o *Netfabb* permite simular é o colapso das estruturas de suporte, um dos problemas mais recorrentes no fabrico aditivo de componentes metálicos. Esta falha é normalmente associada ao deslocamento do componente, devido às tensões residuais acumuladas e, tal como se verificou nos resultados apresentados anteriormente, perspectiva-se uma falha nas estruturas de suporte.

Na figura 34, encontram-se representados os resultados obtidos da simulação do processo de fabrico, referentes à previsão de falha das estruturas de suporte logo após o término do processo de fabrico.

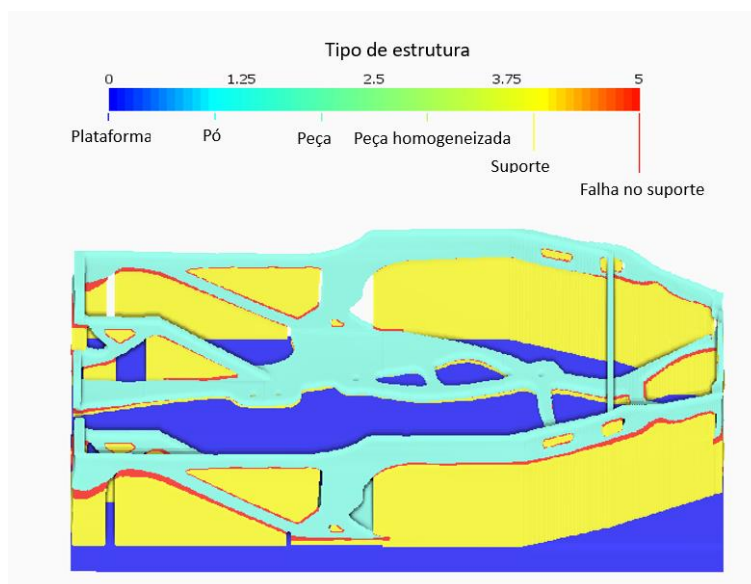


Figura 34 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando na previsão da falha dos suportes (após término do fabrico).

Após análise da figura 34, confirma-se a falha dos suportes, prevista durante a análise dos resultados do deslocamento, aparecendo esta falha representada na figura pela cor vermelha. Importa referir novamente que, esta simulação carece de validação, contudo e verificando-se a veracidade dos resultados, o melhor modo de

corrigir este problema será a criação estruturas de suporte mais robustas e dessa forma mais resistentes, aumentando também consideravelmente as dificuldades nas operações de pós-processamento ou, em alternativa, testar outro tipo de suportes, procedendo sempre a nova simulação. Mais uma vez, a escolha de uma orientação distinta poderia diminuir as tensões residuais acumuladas e fazer este problema desaparecer ou diminuir.

6.4.4.2.3. INTERFERÊNCIA COM O MECANISMO DE RECOBRIMENTO

Distorções de peças durante e após o processo de fabrico, é um dos grandes problemas da fabricação aditiva pois, na maioria dos casos originam componentes defeituosos e, como tal, inadequados à sua função final. Contudo, esse problema revela-se ainda maior quando as distorções observadas nos componentes durante o fabrico são de uma ordem de grandeza tal que existe interferência entre a peça e o equipamento de fabrico. Esta interferência pode revelar-se danosa para a peça, bem como para o equipamento, podendo em situações extremas levar à sua inutilização.

Um dos resultados que o *Netfabb* permite prever com a simulação do processo de fabrico é exatamente a eventualidade desta interferência entre peça e equipamento. Como tal, na figura que se segue encontra-se o resultado da simulação referente à possibilidade de interferência entre mecanismo de recobrimento e componente em fabrico, em três estágios de fabrico distintos (t_1 , t_2 e t_3).

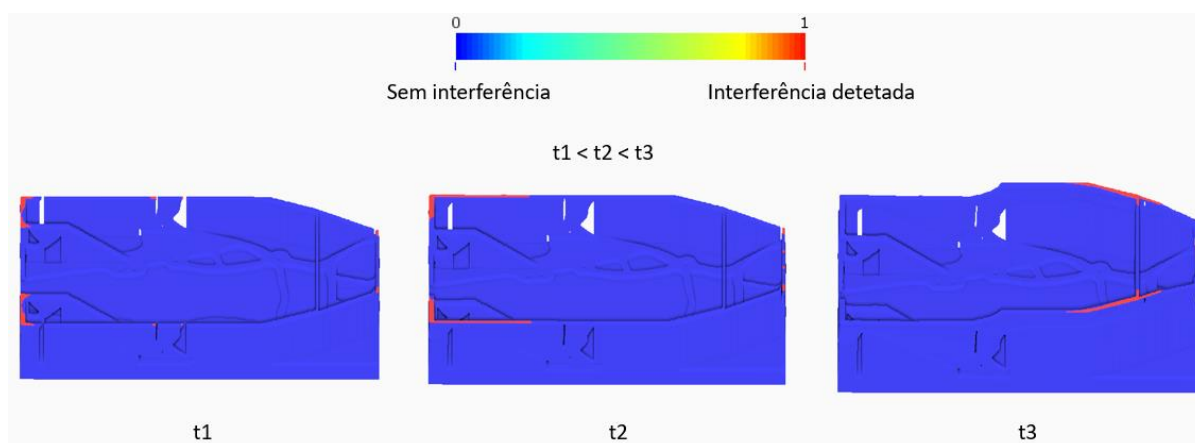


Figura 35 - Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico, atentando na previsão de interferência entre mecanismo de recobrimento e peça, em três estágios distintos do fabrico, t_1 , t_2 e t_3 , onde $t_1 < t_2 < t_3$.

Aquando da análise dos resultados de deslocamento do componente após término do processo de fabrico, era já possível antecipar uma possível interferência entre peça e equipamento durante o fabrico, uma vez que o deslocamento era considerável e a distância entre mecanismo de recobrimento e componente é a equivalente à espessura de uma camada. No entanto, os resultados do deslocamento forneciam valores relativos ao final da produção, tornando-se necessário visualizar a simulação de início a fim, de modo a perceber a possibilidade da existência de interferências. Através da análise da figura anterior, observa-se que existe realmente, durante o fabrico, zonas do componente que devido ao deslocamento originado pelas tensões residuais geradas, podem entrar em contacto com o equipamento de fabrico. A abordagem a este problema, passa de novo pela redução das tensões residuais, devendo-se tentar evitar ou modificar o que poderá estar na sua origem (exposto anteriormente, no tópico referente aos resultados do deslocamento do componente).

Assim sendo, caso não sejam efetuadas alterações no projeto antes de proceder ao fabrico de modo a proceder à validação destes resultados, aconselha-se o acompanhamento do processo de fabrico de modo a evitar possíveis danos no dispositivo de recobrimento utilizado no equipamento de fabrico, embora este possua um mecanismo que interrompe o fabrico aquando um contacto anormal com a peça.

6.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FABRICO SUBTRATIVO E ADITIVO

Sendo este projeto a busca de uma alternativa a uma solução já existente, é imperativo a realização de uma análise comparativa entre a solução prévia e a solução proposta. Ou seja, necessita-se efetuar uma comparação entre o desenvolvimento da solução atual recorrendo a processos subtrativos/tradicionais e, a nova abordagem, utilizando processos aditivos.

Uma vez que não se possuíam todos os dados relativos ao desenvolvimento da solução existente, como por exemplo o tempo despendido na modelação, esta análise será centrada essencialmente em quatro aspetos principais, sendo eles, o número de peças/componentes necessários para o desenvolvimento do sistema de

suporte do *AUV Medusa Deep Sea*, o seu peso, o tempo e custo de fabrico e o desperdício de material verificado.

Assim, após realizado todo o trabalho já apresentado nesta dissertação e reunião dos dados relativos à solução atual, junto do CEiiA, procedeu-se à análise comparativa final. Desta forma, na tabela que se segue encontra-se a comparação entre os dois processos de fabrico.

Tabela 3 - Comparação entre fabrico subtrativo do sistema de suporte do AUV Medusa Deep Sea e fabrico aditivo da solução proposta.

Fabrico	Nº peças	Peso (kg)	Tempo de fabrico	Custo do material (€)	Custo máquina (€)	Desperdício de material (kg)
Subtrativo	9	4,7	64h e 40min	455	3 520 €	465,3
Aditivo	1	2	48h ¹	100 ²	7 200 € ³	0,2 ²

¹ valor estimado através do cálculo da distância total percorrida pelo laser em função da velocidade deste.

² valor utilizado assumindo que existe a possibilidade de reutilização ou recuperação dos pós utilizados (estudo a ser efetuado).

³ valor estimado para uma mesma taxa de amortização da Adira AM e do centro de maquinagem utilizado.

Importa referir que, uma vez que o fabrico aditivo da solução apresentada para o problema nesta dissertação não foi possível ocorrer dentro do calendário de entrega, devido a fatores externos ao autor do trabalho, os dados utilizados para o fabrico aditivo são estimados por excesso, recorrendo ao *Autodesk Netfabb*, bem como à experiência da equipa envolvida no projeto, necessitando de validação aquando do fabrico. Por sua vez, no anexo 15, encontra-se uma tabela detalhada com os dados referentes ao sistema de suporte já fabricado, fornecidos pelo CEiiA. Nos tópicos que se seguem, serão examinados os dados obtidos relativos aos cinco aspetos enumerados anteriormente.

6.5.1. NÚMERO DE COMPONENTES

A redução do número de componentes é um dos principais objetivos da presente dissertação. Neste sentido e, tal como analisado no tópico 6.2.4., com a nova solução atinge-se uma redução bastante significativa destes, passando-se de uma solução constituída por nove componentes para uma solução que utiliza apenas um componente para assegurar a funcionalidade do sistema de suporte.

6.5.2. PESO

Sendo a redução de peso também um dos objetivos do trabalho realizado, os resultados obtidos são também eles bastante positivos, passando-se de uma solução que, quando desenvolvida em aço inoxidável 316L, pesa aproximadamente 4,7 kg, para uma solução com um peso próximo dos 2 kg. Desta forma atinge-se uma redução de peso em percentagem de 57 %, valor considerado bastante significativo.

6.5.3. TEMPO

O tempo associado à conceção de um componente é um dos fatores chave a ter em conta em várias indústrias aquando da seleção de um método de fabrico, como tal, torna-se importante efetuar também uma comparação relativamente ao tempo consumido. Esta comparação, foi apenas efetuada em relação a horas máquina, uma vez que não se possuíam valores relativos ao tempo despendido nas etapas de desenvolvimento do produto da solução atualmente utilizada.

Na tabela do anexo 15, referente à solução atual, visualiza-se que o fabrico via maquinagem das nove diferentes peças, demorou aproximadamente 64h e 40min.

O tempo de fabrico para a solução desenvolvida nesta dissertação foi calculado em função da distância total percorrida pelo laser, sua velocidade e tempo em que este está parado por camada. Assim desenvolveu-se um método que permite estimar o tempo de fabrico de um componente no equipamento protótipo Adira AM. Obtendo-se, desta forma, um tempo de fabrico de 48h. No anexo 16, encontra-se a tabela utilizada para estimar este valor, contudo, este valor necessita também de ser validado aquando do fabrico, pois o tempo que o laser está parado por camada apenas tem em conta o tempo de recobrimento, ignorando a tecnologia patenteada pela Adira, “*tiled laser melting*”, que provoca um ligeiro incremento no tempo que o laser está efetivamente parado por camada. A partir da posterior validação, pode-se proceder ao cálculo de um fator corretivo que torne os valores obtidos utilizando este método, totalmente realistas e transversais a outros componentes fabricados no equipamento Adira AM.

Comparando as duas soluções, obtém-se uma redução de tempo de aproximadamente 25 %, estando-se perante um resultado positivo.

6.5.4. CUSTO

Não sendo a redução dos custos um objetivo principal deste trabalho, é sempre um dos principais aspetos a ter em conta quando se procede ao desenvolvimento de um produto. Como tal, importa comparar alguns dos custos envolvidos.

Para a solução existente, analisando a tabela 3 e os dados no anexo 15, percebe-se que em blocos de metálicos se despendeu aproximadamente 455 € e que, o custo máquina da maquinagem, ficou por aproximadamente 3520 €.

Por sua vez, o fabrico aditivo da solução apresentada nesta dissertação ficaria, em termos de custo de material, por sensivelmente 100 €, valor mais baixo do que o desembolsado na solução existente e que, tem por base, o preço dos pós fixo nos 44 €/kg (baseado nos fornecedores do CEiiA). É de referir que, para este cálculo, foi apenas tido em conta o pó efetivamente fundido durante a construção do componente. Contudo, é necessário utilizar um excedente de pó em grandes quantidades, devido às grandes dimensões da zona de fabrico, sendo o cálculo deste excedente ainda totalmente empírico. Desta forma, estima-se pela experiência das partes envolvidas, uma necessidade de aproximadamente 150 kg de pó metálico o que, caso os pós não sejam possíveis de reutilizar, acresce o custo de material para os 6600 €. Contudo, acredita-se na reutilização destes pois, o mesmo acontece noutros equipamentos de fabrico aditivo metálico, estando a decorrer, atualmente, um estudo que visa verificar esta possibilidade.

Estimou-se ainda o custo máquina para o equipamento protótipo utilizado, tendo como base o preço de um centro de maquinagem de última geração, como o utilizado na solução atual e, um tempo de amortização igual dos dois equipamentos. Assim, sabendo o custo por hora de maquinagem (50 €/h), o custo aproximado do centro de maquinagem (0,5 M€) e o custo aproximado do equipamento Adira AM (1,5 M€), facilmente, para uma mesma taxa de amortização, se chega ao preço por hora na Adira AM (150 €/h). Multiplicando este valor pelo tempo de fabrico estimado, obtém-se um custo máquina de 7200 €, valor superior ao da solução atual. Contudo, quando se analisa estes custos é necessário ter em conta as limitações e vantagens de cada processo, podendo a liberdade geométrica, a diminuição das cadeias de abastecimento, as poupanças significativas de peso, entre outras vantagens, ser uma grande mais valia do método aditivo, o que pode levar à sua escolha mesmo tendo um custo máquina mais elevado.

6.5.5. DESPERDÍCIO DE MATERIAL

Por fim, caminhando-se cada vez mais no sentido de uma indústria mais sustentável e no conceito da circularidade, importa efetuar uma comparação tendo em conta o desperdício de material verificado nos dois processos de fabrico.

Através do volume dos blocos utilizados na construção e do volume de cada um dos nove componentes da solução existente para o problema, chegou-se ao volume de material desperdiçado, atingindo este um valor de cerca de 99 %, o que representa um desperdício de 465,3 kg. Para a solução desenvolvida nesta dissertação, de novo se assume a possibilidade de reutilização dos pós, assim, considera-se o desperdício de material praticamente nulo, sendo que o único material que efetivamente se perde são aproximadamente 0,2 kg de pó utilizado nos suportes, o que relativamente aos 150 kg de pó necessário, representa um desperdício de aproximadamente 0,1 %.

Contudo, caso o fabrico posterior valide a necessidade de utilizar 150 kg e o estudo aos pós excedentes não aprove a sua reutilização, o desperdício de material será cerca de 98,5 %, ou seja, 148 kg de material, valor ainda assim inferior ao verificado na solução subtrativa atual.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em modo de conclusão, nos próximos dois tópicos, são apresentadas primeiramente as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, sendo de seguida deixadas algumas sugestões para as próximas etapas deste projeto.

7.1. CONCLUSÕES

Na presente dissertação, foi desenvolvida com sucesso uma solução alternativa a um conjunto de componentes que constituem um sistema de suporte de um equipamento de prospeção e mapeamento do fundo oceânico, mais concretamente o *AUV Medusa Deep Sea*. Comparativamente com a solução atual, concluiu-se que o modelo 3D desenvolvido nesta dissertação apresenta as seguintes vantagens:

- Menor número de componentes, existindo uma redução de nove para um;

- Redução em peso de 57 % entre a solução atual e a desenvolvida;
- Manutenção dos requisitos mecânicos;
- Menor tempo associado ao fabrico (redução de 25 %, em horas máquina);
- Menor custo relacionado com matéria prima (este custo torna-se superior na solução desenvolvida, caso os pós não possam ser reutilizados);
- Maior custo estimado em horas máquina, para uma mesma taxa de amortização dos equipamentos;
- Menor desperdício de material, sendo este praticamente nulo caso se verifique a reutilização dos pós. Ainda que não se verifique esta possibilidade, os kg de material desperdiçado são menores, contudo neste caso deve-se atentar nos custos do material;

Assim sendo, através das conclusões enumeradas, considera-se que os principais objetivos da dissertação foram atingidos.

Além disso, tornou-se possível constatar com esta dissertação que, a impressão 3D e todas as tecnologias recentes a ela associadas, tais como a simulação para otimização topológica empregue neste trabalho, podem definitivamente aproximar a engenharia de produto a soluções até então impensáveis de um modo bastante mais expedito, assentando desta forma o avanço tecnológico. É, assim, tremendamente expectável a sua crescente taxa de utilização.

Contudo, os resultados obtidos apesar de satisfatórios não conduzem este trabalho a um estado final, sendo ainda necessários trabalhos futuros.

7.2. SUGESTÕES FUTURAS

Como nota final nesta dissertação, serão apresentados neste tópico algumas sugestões, de modo não só a seguir com este trabalho, procedendo à impressão do componente, bem como a aspetos que se foram sendo apreendidos ao longo do trabalho e que poderão tornar-se bastante relevantes em trabalhos futuros:

- **Antes da impressão do componente:**

Apesar da necessidade de validação e otimização dos resultados da simulação do processo de fabrico por se tratar de uma tecnologia recente e ser desenvolvida pela primeira vez para a Adira AM, antes de se proceder à impressão do componente e, tendo os resultados da simulação previsto tensões demasiado elevadas que

estariam na origem de prováveis erros, é aconselhável utilizar uma estratégia de varrimento do laser “*chessboard*”. Sendo esta considerada a estratégia que gera menos gradientes térmicos. Após esta alteração, aconselha-se nova simulação do processo para poder comparar posteriormente com os resultados de fabrico.

- **Após impressão do componente:**

Validar e otimizar a simulação do processo de fabrico, de modo a torná-la o mais real possível para futuros componentes.

Antes de remover os suportes e a plataforma de construção, aconselha-se a realização de um tratamento térmico de alívio de tensões, pois após remoção dos suportes pode-se verificar o aparecimento de distorções.

Proceder a ensaios mecânicos de modo a validar o componente obtido, uma vez que se trata de uma solução que recorre a uma tecnologia aditiva, num equipamento protótipo e que tem por base um conjunto de ferramentas recentes, tais como a simulação para otimização topológica do *Autodesk Fusion 360*.

Proceder a ensaios corrosivos, de modo a perceber a resistência à corrosão de um aço inoxidável fabricado aditivamente, para aplicação em ambiente marinho.

- **Trabalhos futuros:**

Futuramente e de modo a atingir novas soluções, comparando-as com as desenvolvidas e obtidas em fruto desta dissertação, sugere-se a utilização de ferramentas de *design* generativo.

Além disso, sugere-se o teste da ferramenta “*wrapped .stl*” presente no *Netfabb* após simulação do processo de fabrico. Este permite gerar um modelo no qual as distorções são compensadas em sentido contrário, ou seja, o modelo é deformado propositadamente no sentido inverso à perspetivada deformação, permitindo após fabrico o componente ficar dentro da cotagem pré-estabelecida.

Aconselha-se também a certificação da possibilidade de reutilização dos pós metálicos, uma vez que ao confirmar-se esta possibilidade, o processo de fabrico torna-se automaticamente mais rentável e competitivo.

Sugere-se ainda, um método exato de quantificação do pó necessário para produzir um determinado componente. Pois, sendo a área de trabalho da Adira AM de grandes dimensões existe a necessidade de utilização de grandes quantidades de excesso de pó para produzir um componente de pequeno volume, resultando isto por vezes em desperdícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

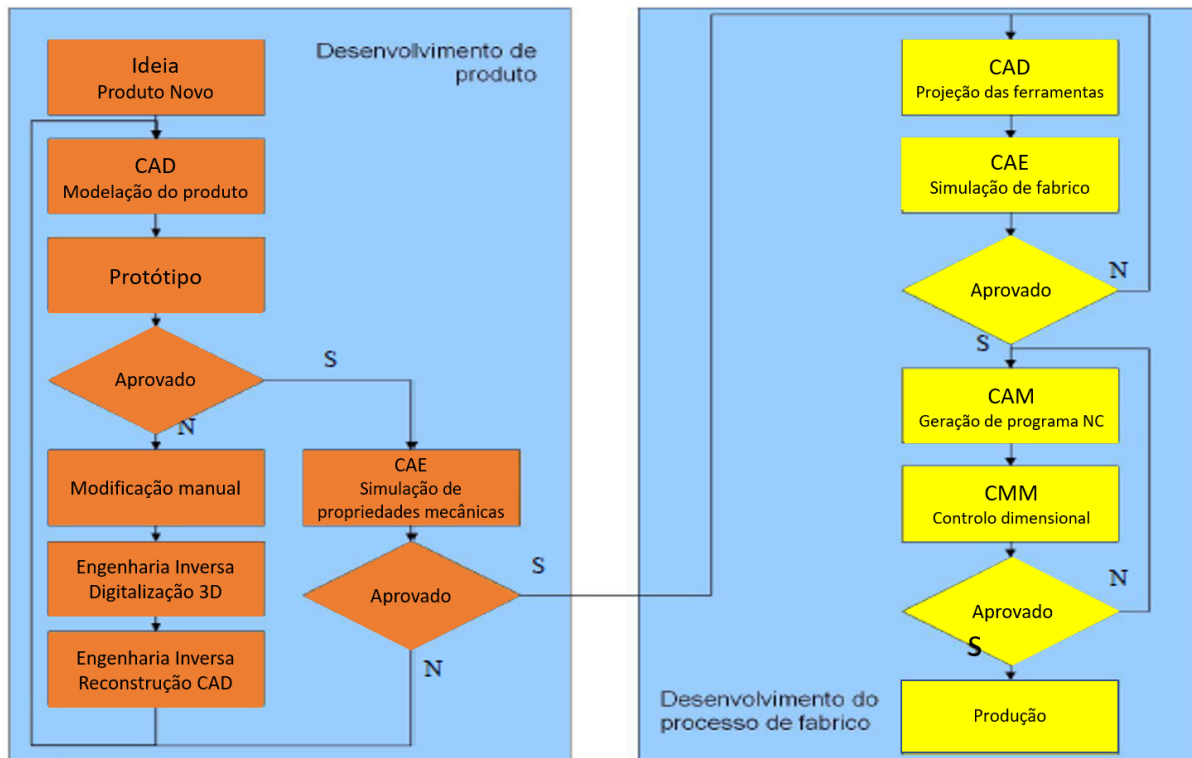
1. Relvas, C., *Controlo Numérico Computorizado*, ed. Publindústria. 2012: Publindústria.
2. Ramos, A.M., et al., *Engenharia + Design: da ideia ao produto*, ed. Publindústria. 2017: Publindústria.
3. Augusto, V.M., *Textos de apoio à disciplina de Engenharia Assistida por Computador*. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
4. Couto, B., *Aplicação e desenvolvimento em células de fabrico por maquinaria robotizada*, in *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. 2013, Universidade do Porto.
5. Surleraux, A., et al., *Using voxels in the simulation of manufacturing processes*. 2015.
6. Zienkiewicz, Taylor, and Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 2005: Butterworth-Heinemann.
7. Costa, R., *Desenvolvimento de célula robótica para polimento automático de moldes*, in *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. 2017, Universidade do Porto.
8. Sundar, S., S.T. Selwyn, and C. Elanchezhian, *Computer aided manufacturing*. 2005: Firewall Media.
9. Alexandra. *RAMLAB continuous forward in their creation of a 3D printed boat propeller*. 2017 [13 de março de 2018]; Available from: <https://www.3dnatives.com/en/ramlab-boat-propeller-150920174-99/>.
10. Molitch-Hou, M., *Topology Optimization for 3D Printing Hits the Cloud with Generate*, in *engineering.com*. 2016.
11. Panesar, A., et al., *Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing*. Vol. 19. 2017.
12. Sudin, M.N., et al., *Topology optimization in automotive brake pedal redesign*. International Journal of Engineering and Technology (IJET), 2014. 6(1): p. 398-402.
13. Autodesk. *Autodesk Knowledge Network -Netfabb 2018*. 2018 [14 de março de 2018]; Available from: <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>.
14. Autodesk. *Generative Design*. 2018 [24 de março de 2018]; Available from: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>.
15. Coors-Blankenship, J. *Additive Manufacturing: Possibility Meets Reality Through Generative Design*. 2017 [24 de março de 2018]; Available from: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2017/10/18/additive-manufacturing-possibility-meets-reality-through-generative-design/#2efd5bb51ed5>.
16. SWENSON, K. *What Is Generative Design?* 2016 [24 de março de 2018]; Available from: <https://www.autodesk.com/redshift/what-is-generative-design-2/>.
17. MetalAM. *General Motors adopts Autodesk's newly launched generative design software for enhanced lightweighting*. 2018 [20 de maio de 2018]; Available from: <http://www.metal-am.com/general-motors-adopts-autodesks-newly-launched-generative-design-software-for-enhanced-lightweighting/>.

18. Airbus. *Airbus' bionic 3D printing*. 2016 [24 de março de 2018]; Available from: <http://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/03/Pioneering-bionic-3D-printing.html>.
19. Bugatti. *WORLD PREMIERE: BRAKE CALIPER FROM THE 3D PRINTER*. 2018 [26 de março de 2018]; Available from: <https://www.bugatti.com/de/media/news/2018/bugatti-weltpremiere-bremssattel-aus-dem-3d-drucker/>.
20. Frazier, W.E., *Metal Additive Manufacturing: A Review*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014. 23(6): p. 1917-1928.
21. Costa, P., *Novas abordagens à Fabricação Aditiva*. 2018, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
22. Varotsis, A.B. *3D Printing Technologies*. 2017 [14 de maio de 2018]; Available from: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing#author>.
23. Adira. *Adira AM*. 2018 [14 de maio de 2018]; Available from: <http://www.adira.pt/004.aspx?dqa=0:0:0:9:0:0:-1:55:0>.
24. Davies, S., *Adira combines both laser-based additive manufacturing technologies in conceptual machine*, in *TCT Magazine*. 2016.
25. CEIIA. *OPENING THE DEEP SEA FRONTIER*. 2018 [26 de março de 2018]; Available from: <http://www.medusadeepsea.com/about.html>.
26. CEIIA. *Medusa Deep Sea*. 2018 [26 de março de 2018]; Available from: <https://www.ceia.com/offshore-deep-sea>.
27. IST. *Medusa Deep Sea ultrapassou o primeiro grande teste com sucesso*. 2017 [26 de março de 2018]; Available from: <https://tecnico.ulisboa.pt/pt/noticias/campus-e-comunidade/medusa-deep-sea-ultrapassou-o-primeiro-grande-teste-com-sucesso/>.
28. Autodesk. *Autodesk Knowledge Network -Fusion 360*. 2018 [4 de abril de 2018]; Available from: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.
29. Augusto, V.M., *Textos de apoio à disciplina de Desenho Assistido por Computador* 2014, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
30. Autodesk. *Autodesk Knowledge Network -PowerSHAPE 2018*. 2018 [21 de março de 2018]; Available from: <https://www.autodesk.com/products/powershape/overview>.
31. Costa, S., *Rebarbagem em célula robô através de programação offline em CAM*, in *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. 2016, Universidade do Porto.

ANEXOS

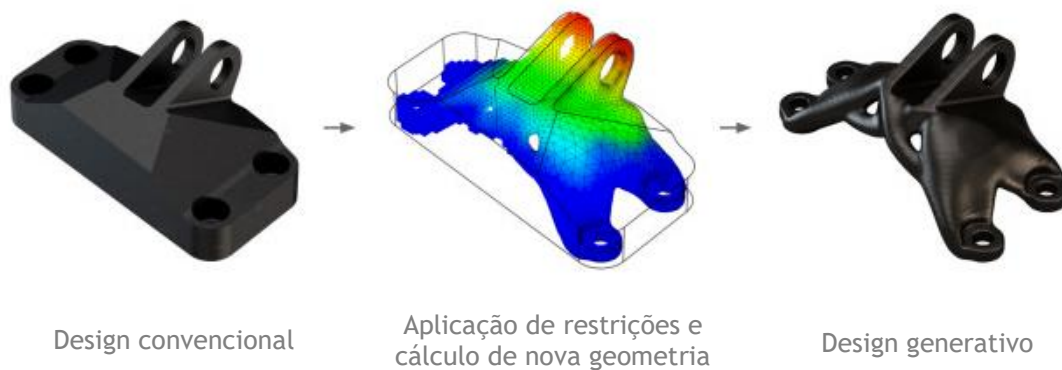
Anexo 1

Esquema representativo do desenvolvimento e concepção de um produto (adaptado de Textos de apoio à disciplina de Engenharia Assistida por computador - VMA) [3].



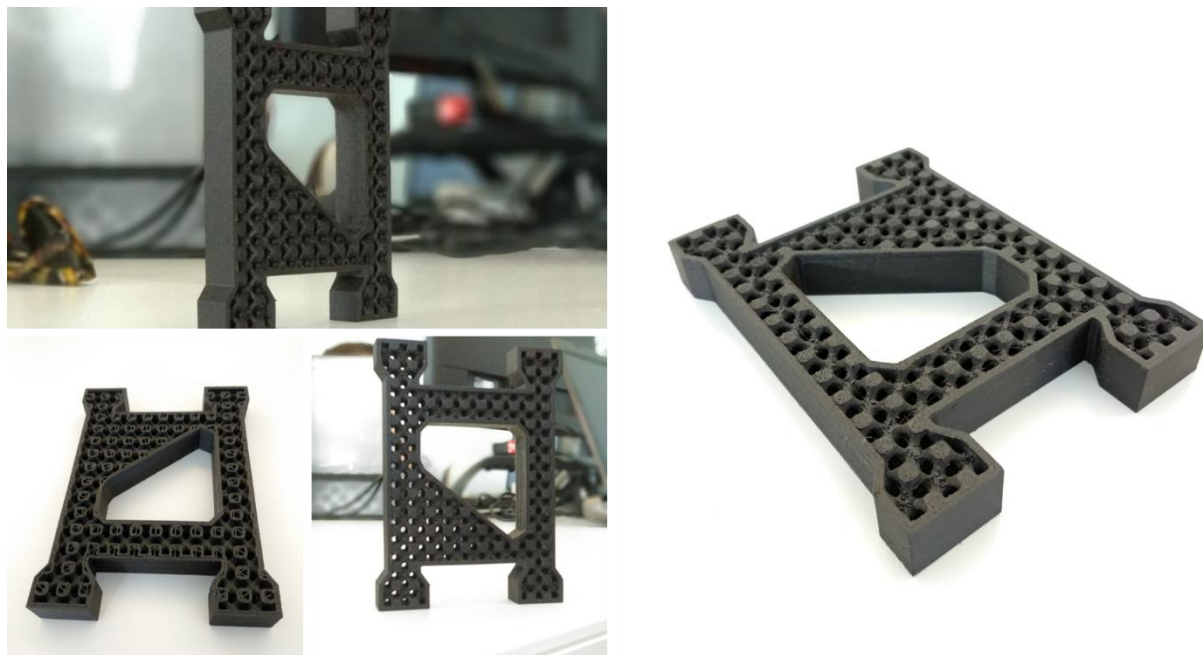
Anexo 2

Esquema ilustrativo de evolução de uma geometria convencional para uma geometria generativa [10]



Anexo 3

Peça otimizada topologicamente, na qual foram criadas estruturas em rede. Esta foi desenvolvida a título demonstrativo das potencialidades de *softwares* tecnologicamente avançados, como o *Autodesk Netfabb*, quando associados a tecnologias de fabrico aditivo. A impressão deu-se durante a presente dissertação de mestrado num equipamento de impressão da *Markforged*.



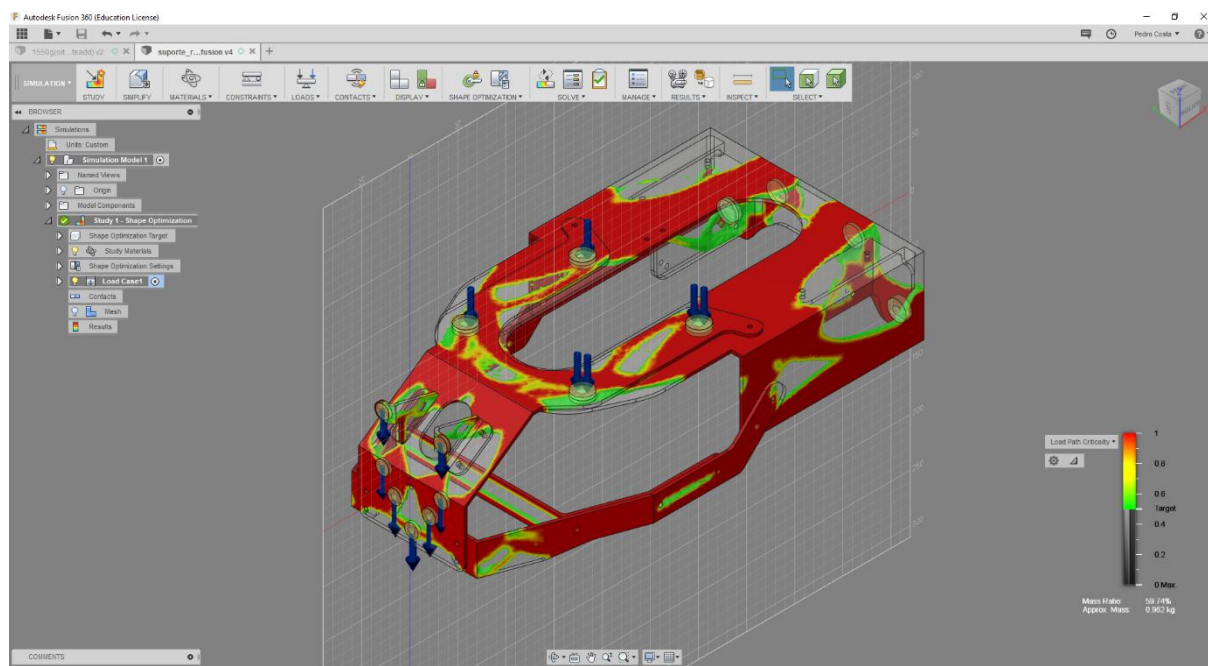
Anexo 4

Calliper desenvolvido pela *Bugatti*, recorrendo ao *design* generativo e à impressão 3D metálica [19].



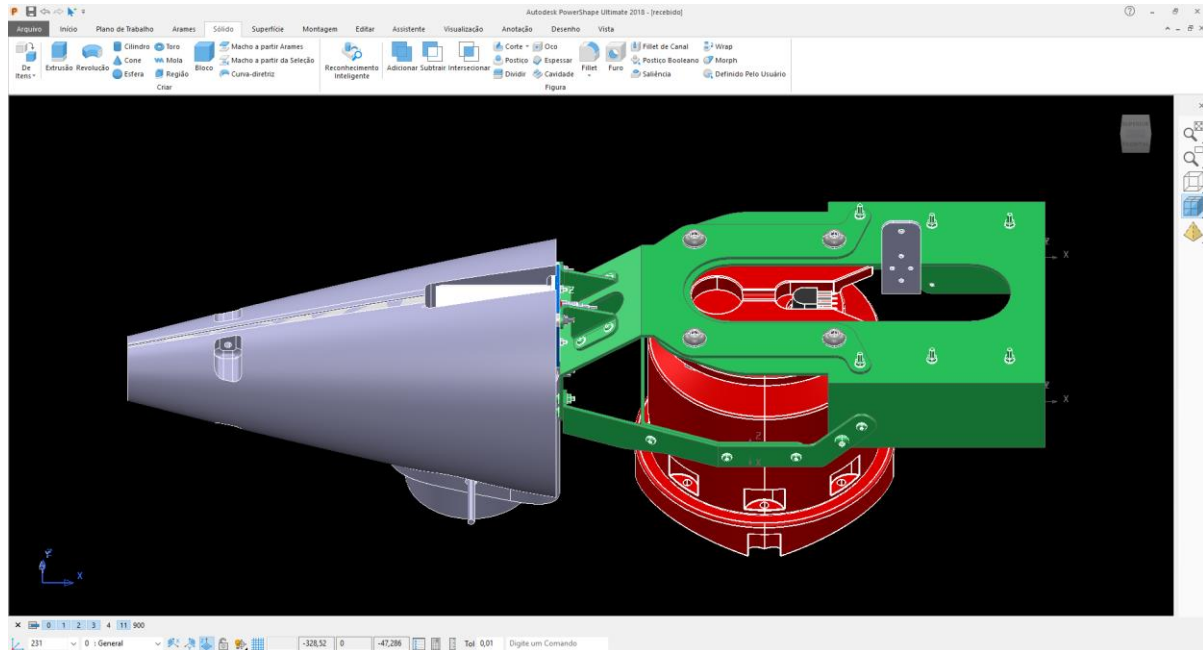
Anexo 5

Interface com o utilizador do *software Autodesk Fusion 360* em modo simulação. Nesta interface pode-se ainda visualizar o componente em estudo, numa das várias simulações efetuadas.



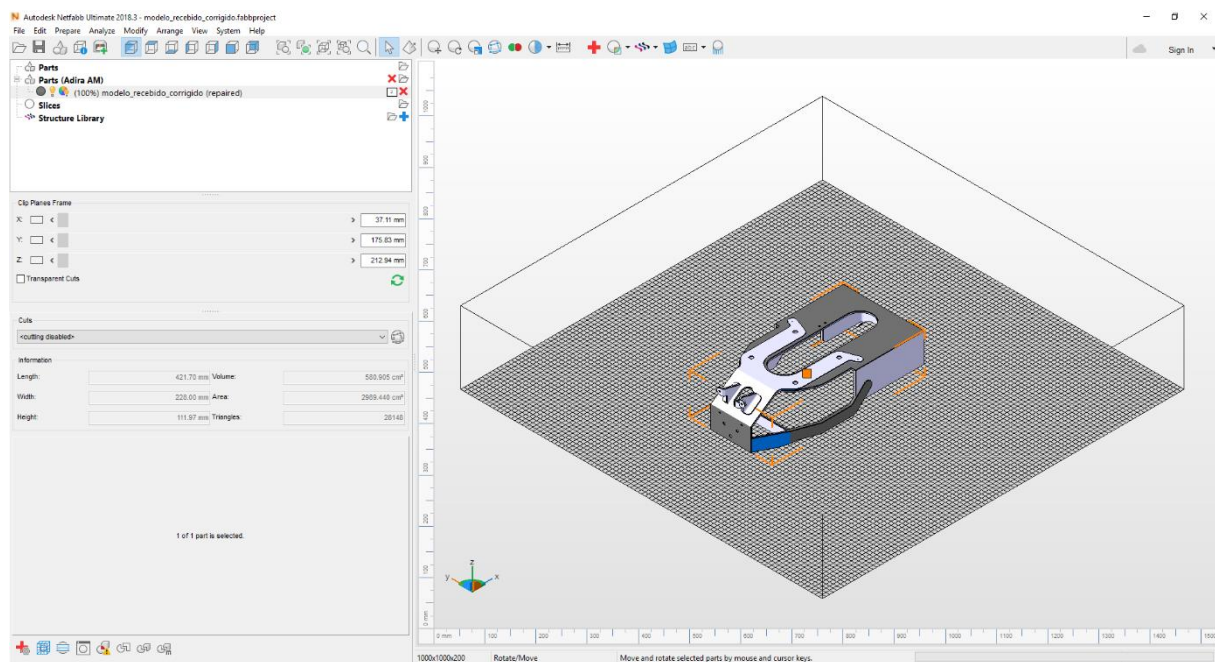
Anexo 6

Interface com o utilizador do *software Autodesk PowerShape* e sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea* com componentes acoplados.



Anexo 7

Interface com utilizador do *Autodesk Netfabb Ultimate 2018.3*.




Anexo 8


Ficha técnica com problemática do trabalho, disponibilizada pelo CEiiA;

Information on Support for Topological Optimization

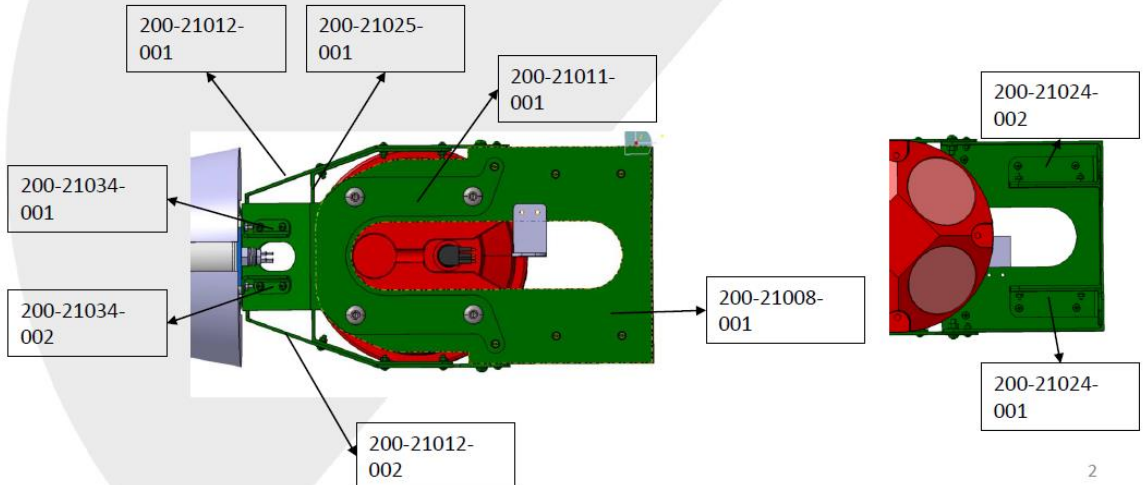
27th March 2018



- Stress – Lifting Support

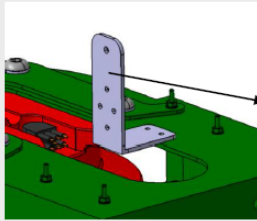


All the green parts can be integrated in a single component after topological optimization



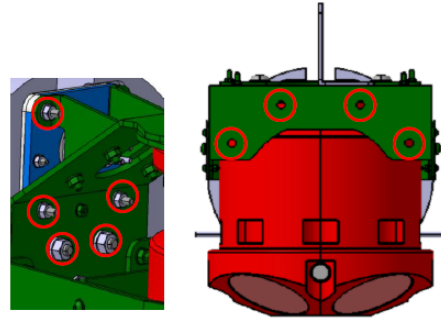
• Stress –Support for equipment

The lower support has 9 PNs
 200-21008-001
 200-21024-001 (2x) - Symmetrical
 200-21012-001
 200-21012-002
 200-21025-001
 200-21011-001
 200-21034-001
 200-21034-002

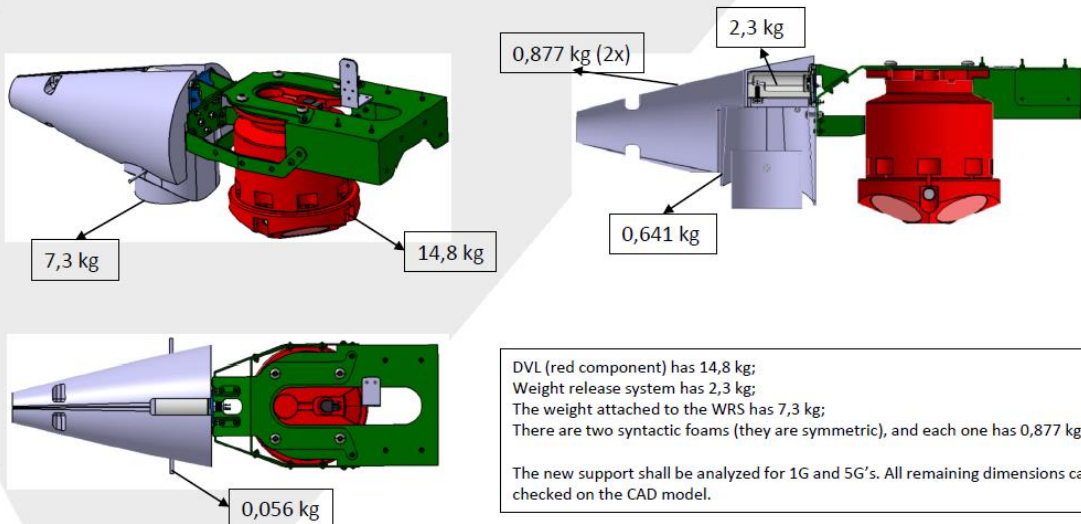


200-21022-001
 This support shall be considered although it does not have any structural objective for the main support. The main purpose is to keep the fairing attached to the support, not the opposite.

The red dots (holes for bolts) shall not be changed and constraints should be placed on these locations.



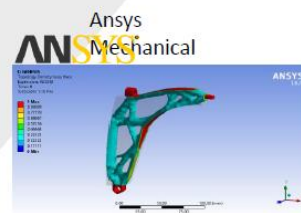
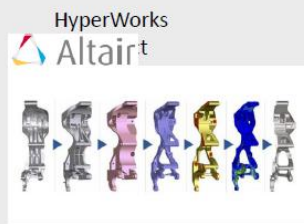
3



4

Optimization Tools

CEIIA

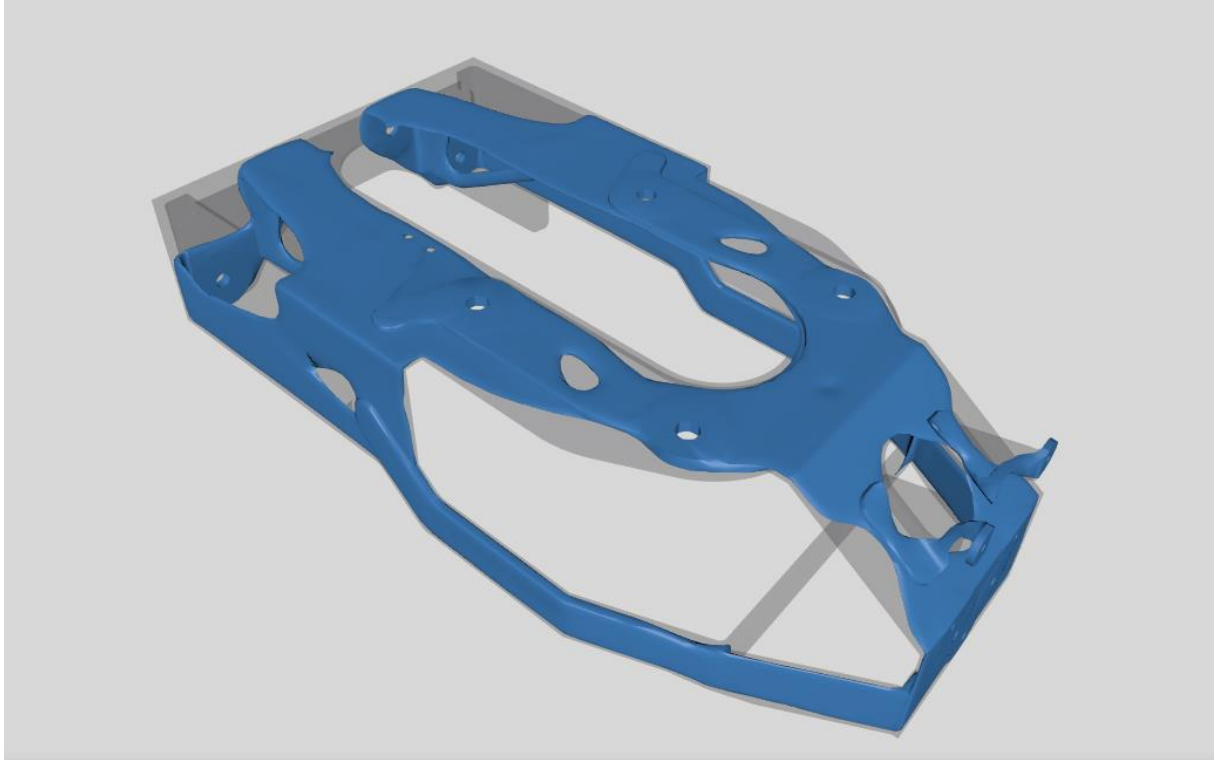


5

www.ceiia.com

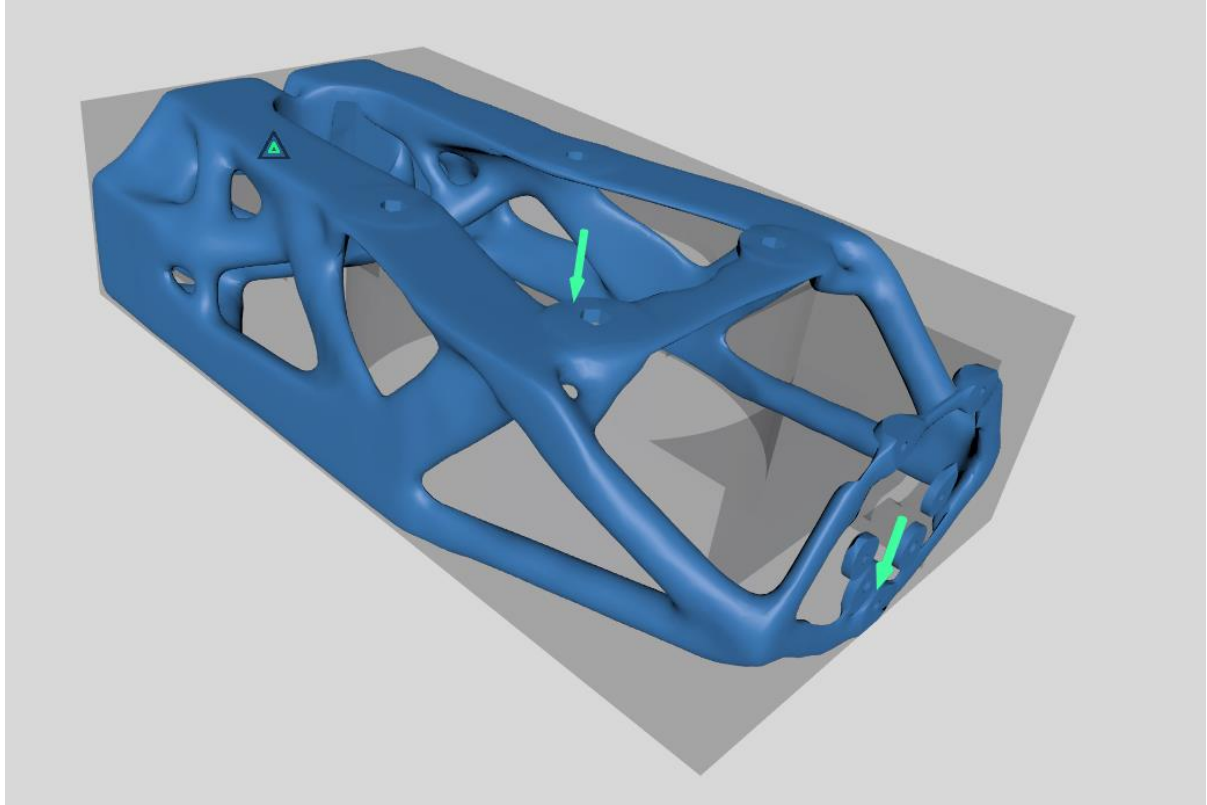
Anexo 9

Resultado obtido para a otimização topológica automática partindo do modelo pré-existente e com recurso ao *software* em *cloud Generate*;



Anexo 10

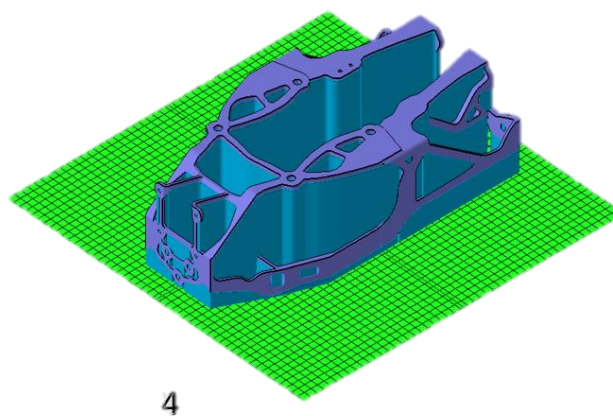
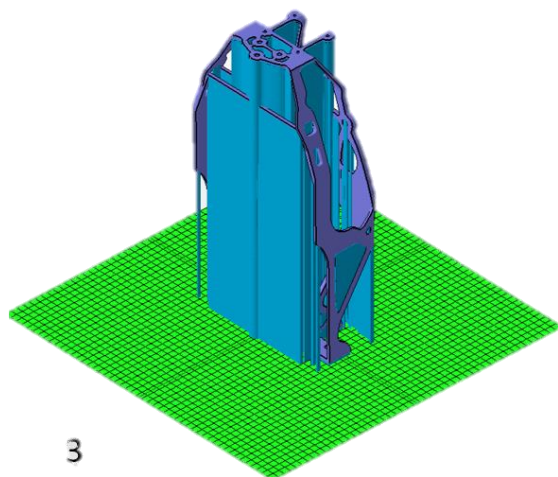
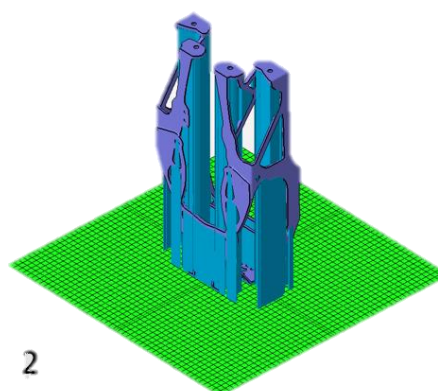
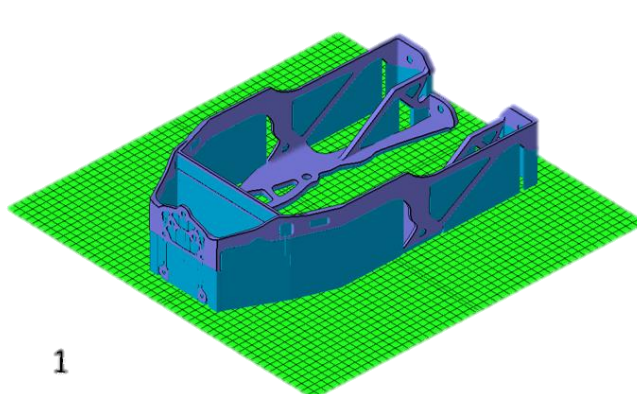
Resultado obtido para a otimização topológica automática partindo de um bloco e com recurso ao *software* em *cloud Generate*;

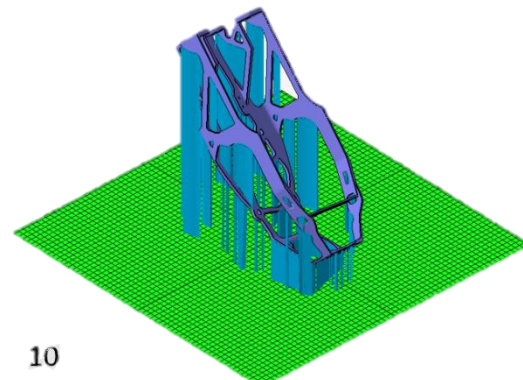
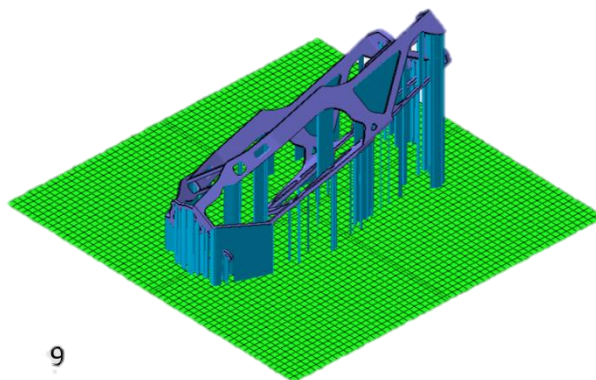
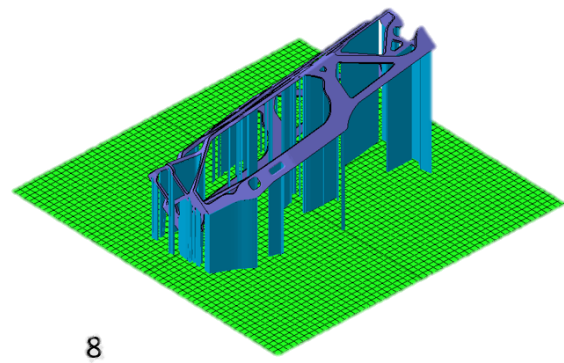
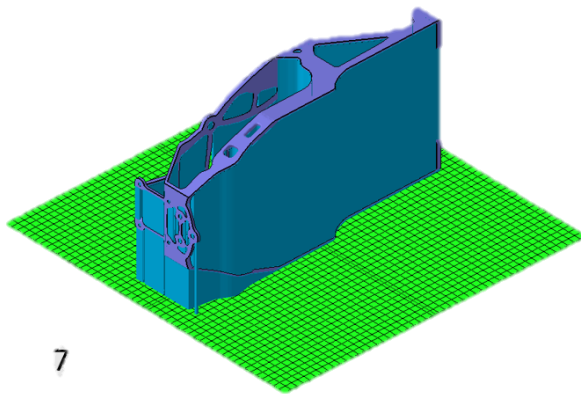
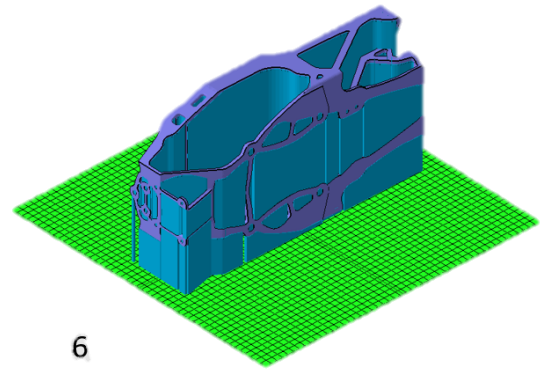
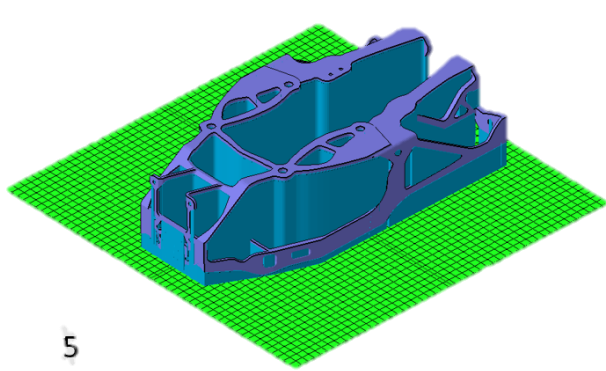


Anexo 11

Diferentes possibilidades de orientações do componente, originadas automaticamente pelo *Netfabb*, aquando da busca pela orientação mais adequada ao fabrico.




































Rank	Supported area (cm ²)	Support volume (cm ³)	Outbox volume (cm ³)	Height (mm)	Center of gravity height (mm)
1	327.220	453.709	10281.345	111.6	42.7
2	124.434	2028.462	10281.342	424.5	225.1
3	132.936	2270.134	10281.343	424.5	201.5
4	332.510	2621.430	10316.339	112.2	69.2
5	332.374	2673.017	10281.343	111.6	70.9
6	318.048	2807.990	10281.342	224.0	113.3
7	318.399	2809.902	10281.346	224.0	112.7
8	43.221	468.319	24930.582	249.5	137.7
9	70.782	366.047	28140.432	277.2	119.2
10	49.299	489.997	37017.289	398.5	196.5





















































Anexo 12

Valores utilizados na criação dos suportes empregues neste projeto, suportes do tipo “*area with volume support*”, escolhidos a partir dos vários suportes existentes no *Netfabb* e tendo por base um exemplo fornecido pelo *software* para *powder bed fusion*.

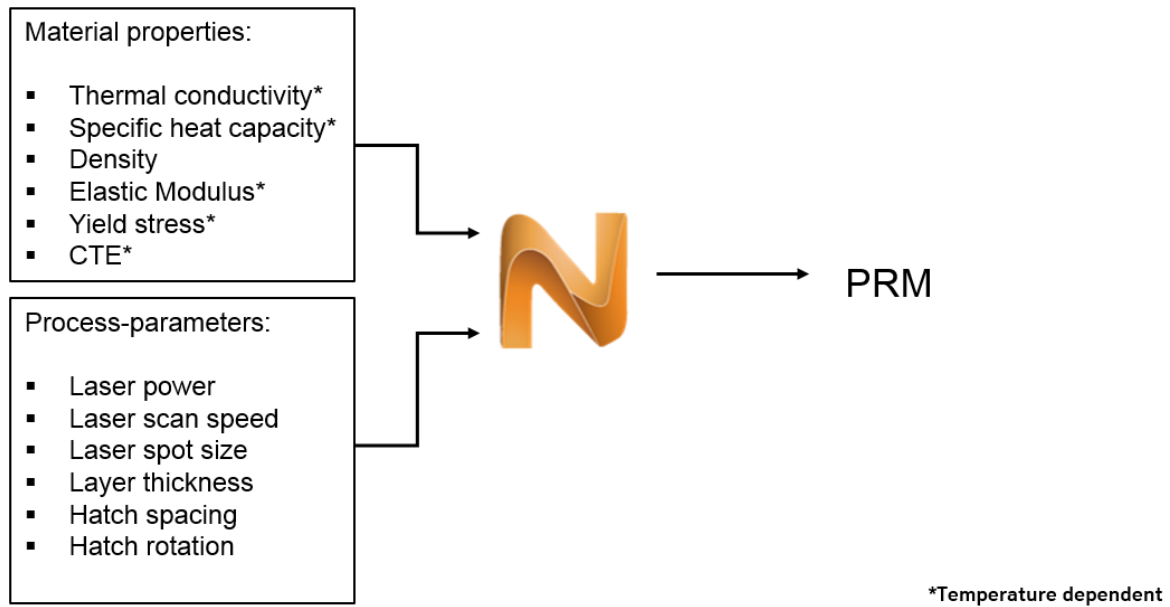
Support action		
	Area with volume support	 
	Description	
	Cluster	
	Minimal area	0.00 cm ²
	Maximal area	10000.00 cm ²
	Critical angle	46.80 °
	Non-critical angle	40.00 °
	Cluster type	All
	Duplicate support	Avoid duplicate support
	Cluster inside or outside	All
	Keep distance to support	No
	Distance to other support	1.00 mm
	Minimal area above part	0.00 %
	Maximal area above part	100.00 %
	Minimal z height	0.00 mm
	Maximal z height	10000000.00 mm
	Respect CAD face groups	No
	Contour accuracy	0.05 mm
	Contour offset to wall	0.40 mm
	Free contour offset	0.10 mm
	Support properties	Entity volume
	Filling type	Structured
	Top distance to part	0.00 mm
	Bottom distance to part	0.00 mm
	Structure properties	
	Structure Pattern	Wired wall
	Width	2.00 mm
	Height	3.00 mm
	Interval width	0.50 mm
	Interval height	0.50 mm
	Thickening up structure-hatches	0.10 mm
	Thickening up top connections	-1.00 mm
	Thickening up bottom connections	-1.00 mm

...	Stitch tolerance	0.00 mm
...	Maximum height	0.00 mm
...	Solid structure for height	0.00 mm
-	Fin	
...	Create fin	Yes
...	Width	0.60 mm
...	Keep distance to support	0.00 mm
...	Top distance to part	1.00 mm
...	Bottom distance to part	1.00 mm
...	Use density map	No
-	Raster	
...	Rotate by Z	5.00 °
...	Hatch distance	2.50 mm
...	Filling strategy	Hatches in X and Y
-	Contour	
...	Contour count	1 #
...	Contour distance	1.00 mm
...	Smoothing distance	1.00 mm
-	Connection	
-	Top part connection	
...	Connection	Trapoid
...	Connection width	0.20 mm
...	Pin distance	0.00 mm
...	Connection height	1.00 mm
...	Distance connection to structure	0.50 mm
...	Pins per structure	1 #

 Bottom part connection	
 Connection	Trapoid
 Connection width	0.20 mm
 Pin distance	0.00 mm
 Connection height	1.00 mm
 Distance connection to structure	0.50 mm
 Pins per structure	1 #
 Platform connection	
 Connection	Trapoid
 Connection width	0.30 mm
 Pin distance	0.00 mm
 Connection height	1.00 mm
 Distance connection to structure	0.50 mm
 Hatches	1 #
 Hatch distance	0.10 mm
 Pins per structure	1 #
 Connection in Y	
 Connection	Strip
 Connection width	0.20 mm
 Pin distance	0.00 mm
 Connection height	1.00 mm
 Distance connection to structure	0.50 mm
 Pins per structure	2 #
 Different connection in Y	No
 Connection by layer	
 Create layer	No
 Refine layer	2.00 mm
 Top Layer height	0.50 mm
 Top layer distance to structure	0.00 mm
 Pin Type	Cross
 Pin width	0.40 mm
 Pin density	2.00 mm
 Fragments	
 Raster	
 Fragments	No
 Fragment size X	5.00 mm
 Fragment size Y	5.00 mm
 X shrinkage	100.00 mm
 Y shrinkage	100.00 mm
 Fragment gap	1.00 mm
 Offset in X	0.00 mm
 Offset in Y	0.00 mm
 Contour	
 Fragment Contour	No
 Fragment contour length	20.00 mm
 Fragment contour gap	0.40 mm
 Shrinkage width	1000.00 mm
 Angled block support	No

Anexo 13

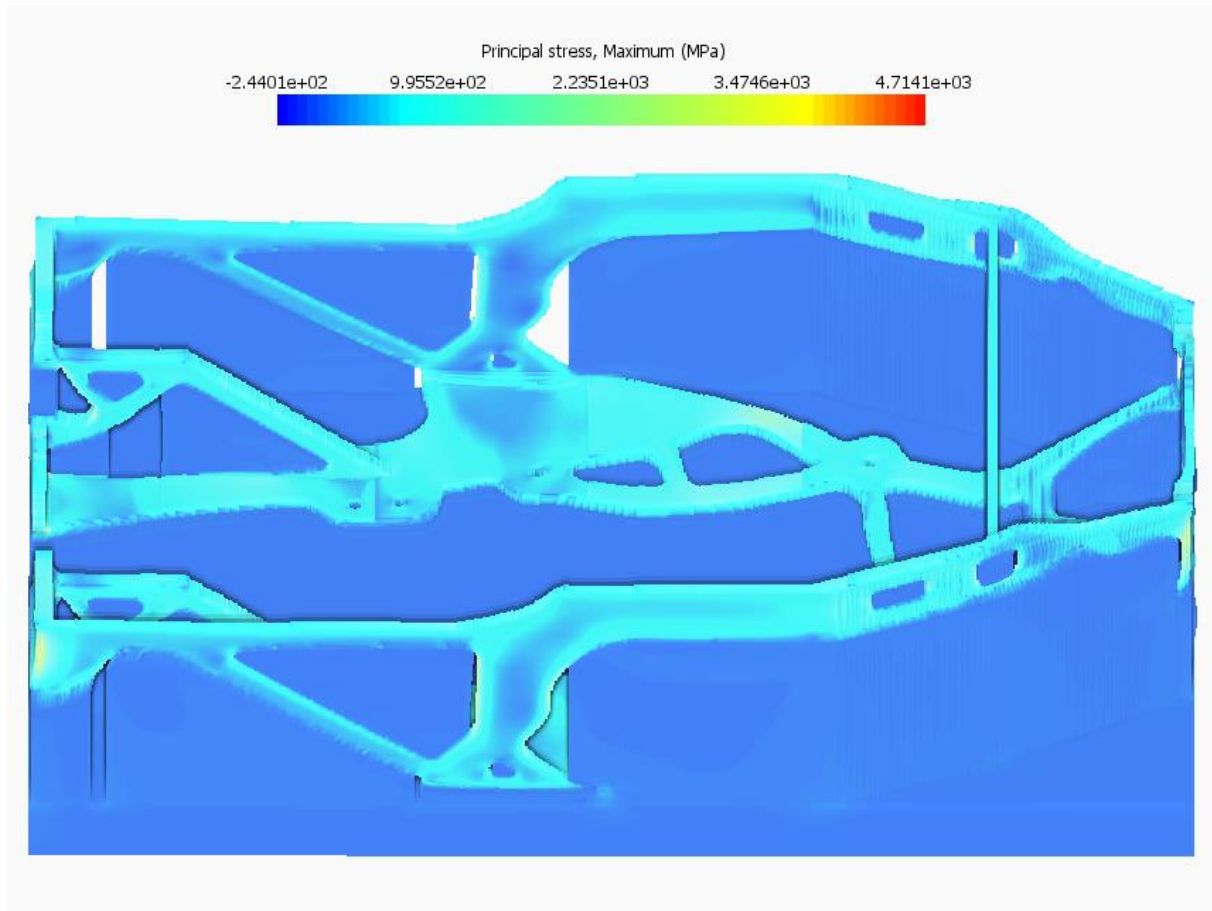
Propriedades de material e parâmetros máquina necessários para a criação de um ficheiro “.prm”, essencial à simulação do processo de fabrico [13].



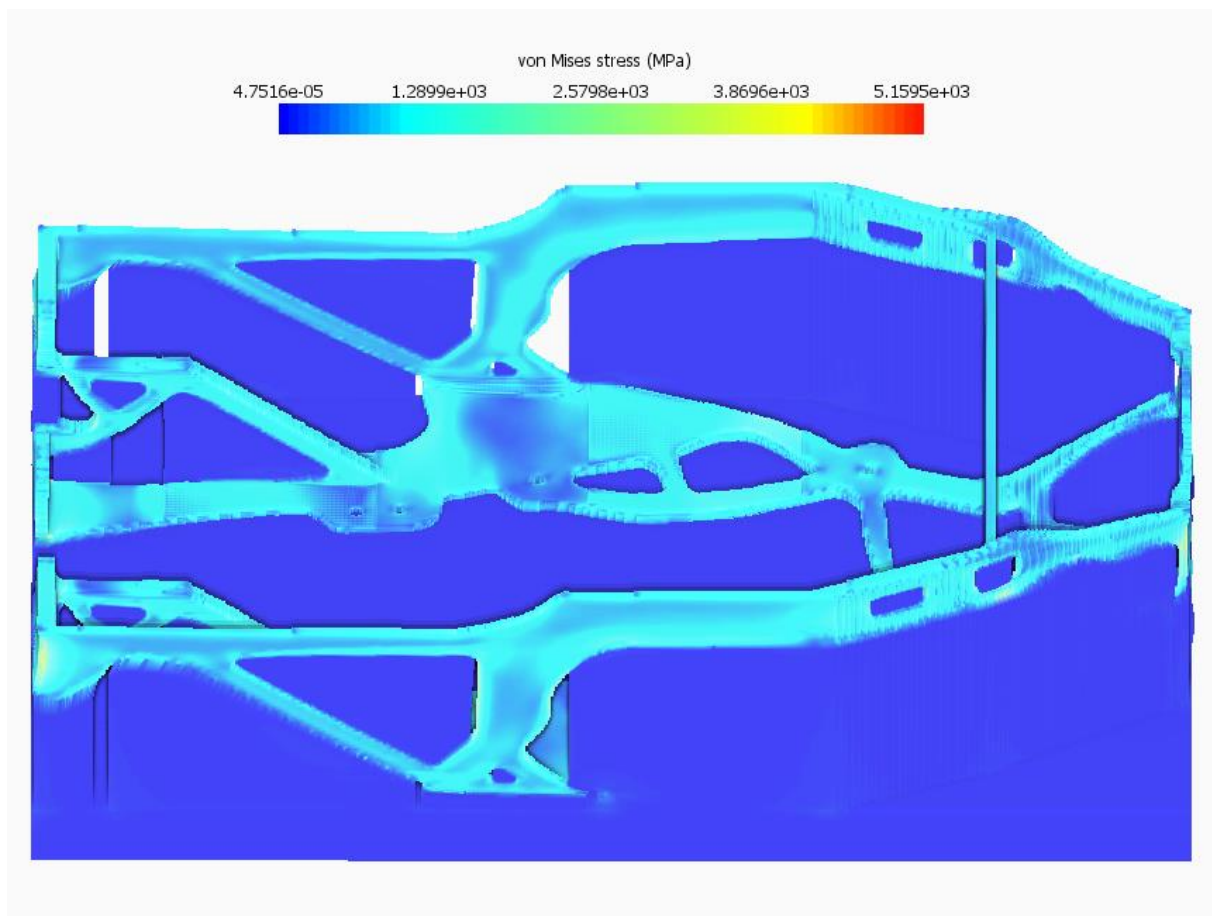
Anexo 14

Resultados obtidos na simulação do processo de fabrico:

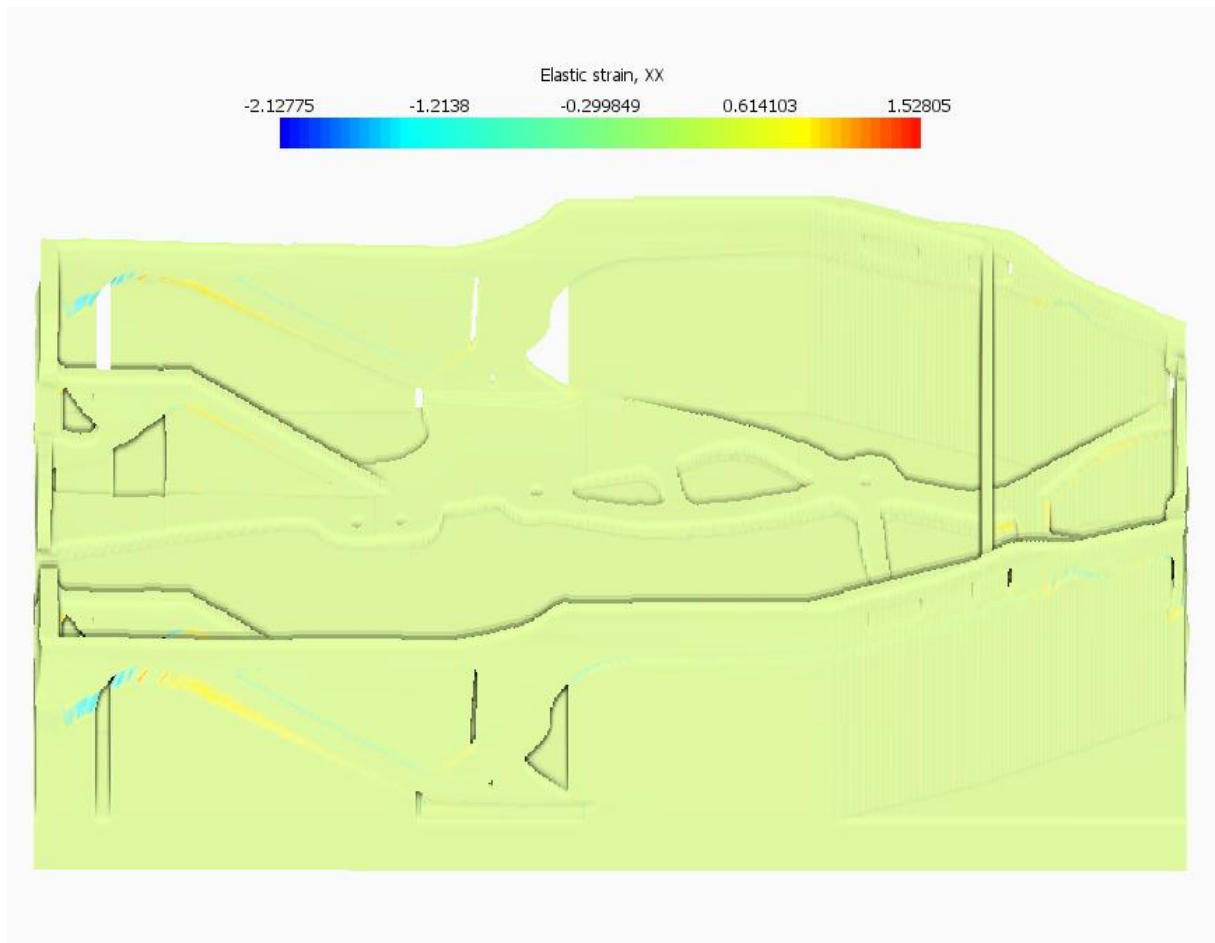
a) *Principal Stress*, no momento em que termina a produção do componente;



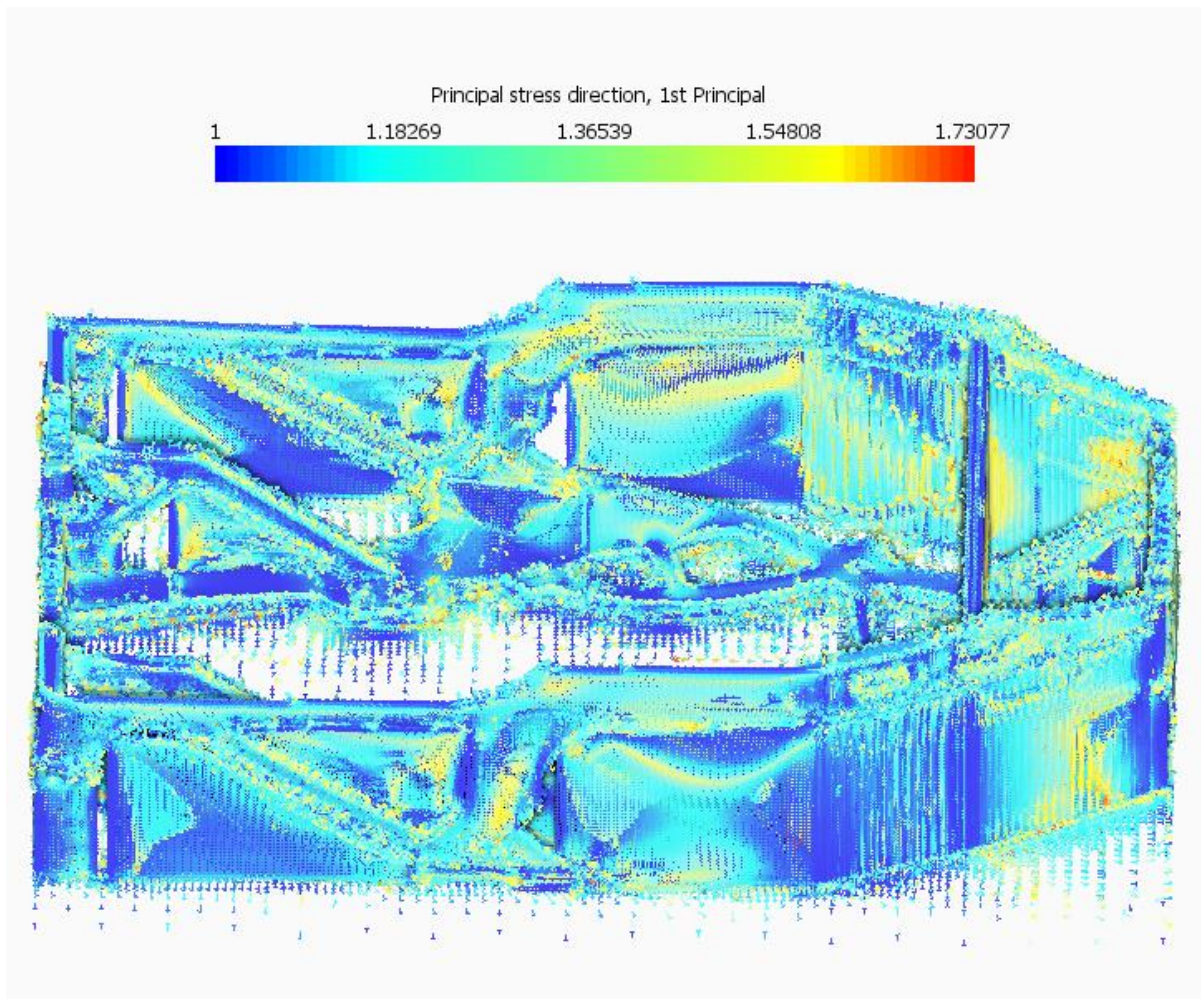
b) *von Mises Stress*, no momento em que termina a produção do componente;



c) *Elastic Strain*, no momento em que termina a produção do componente;



d) *Principal Stress Direction*, no momento em que termina a produção do componente;



Anexo 15

Dados fornecidos pelo CEiiA, relativos ao fabrico da solução existente para o sistema de suporte do *AUV Medusa Deep Sea*.

Componente obtido por maquinaria								
Componente	Bloco (mm)	Volume bloco (mm3)	Volume peça (mm3)	Material aproveitado (%)	Custo do bloco	Tempo de maquinaria	Preço de maquinaria	
1	200-21034-001.1	50x60x70	210000	5489,8	2,61%	0,65 €	20min	10,00 €
2	200-21034-002.1	50x60x70	210000	5489,8	2,61%	0,65 €	20min	10,00 €
3	200-21011-001	350x350x150	18375000	96548,32	0,53%	90 €	14h	760 €
4	200-21012-001	350x150x100	5250000	25221,66	0,48%	21 €	7h	350 €
5	200-21012-002	350x150x100	5250000	25221,66	0,48%	21 €	7h	350 €
6	200-21025-001	200x250x250	12500000	34433,58	0,28%	220 €	13h	860 €
7	200-21024-001	150x150x100	2250000	34673,8	1,54%	5,50 €	2h e 30min	120 €
8	200-21024-002	150x150x100	2250000	34673,8	1,54%	5,50 €	2h e 30min	120 €
9	200-21008-001	400x250x150	15000000	313293,83	2,09%	90 €	18h	940 €
Total		61295000	575046,25	1%	454,30 €	64h e 40min	3 520,00 €	

Anexo 16

Valores utilizados para estimar o tempo de fabrico da solução desenvolvida nesta dissertação, no equipamento de fabricação aditiva protótipo Adira AM.

Tempo de fabrico na Adira AM	
distância total percorrida pelo laser (mm)	76561070
velocidade do laser (mm/s)	600
nº de camadas	2252
tempo laser parado por camada (s) ¹	20
tempo total de fabrico (s)	172641.78
tempo total de fabrico (h)	47.96

¹ valor aproximado, depende dos "tileds" em cada camada e parking/tempo de recobrimento.